

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Материалы XXIII Всероссийской
научно-технической конференции
с международным участием**

8–10 апреля 2026 г.

**Самара
Самарский государственный технический университет
2026**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Материалы XXIII Всероссийской
научно-технической конференции
с международным участием

8–10 апреля 2026 г.

Самара
Самарский государственный технический университет
2026

Издается по решению методического совета факультета машиностроения, металлургии и транспорта СамГТУ (протокол № 8 от 10.03.2026)

УДК 621.002(06)

ББК 34я4

В 932

Высокие технологии в машиностроении: материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 8–10 апреля 2026 г. [Электронный ресурс] / Отв. ред. *А.Р. Галлямов*. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2026. – 1 электрон. опт. диск.

ISBN 978-5-7964-2511-4

Сборник содержит тезисы докладов участников XXIII Всероссийской научно-технической конференции 2026 г. по следующим основным направлениям: проектирование, эксплуатация и метрологическое обеспечение инструментальных систем и оборудования современных машиностроительных производств; инновационные направления в науке и образовании; цифровые технологии в машиностроении и промышленном дизайне; материаловедение и металлургия в современном машиностроении.

Материалы предоставлены сотрудниками высших учебных заведений и ведущих промышленных предприятий России, стран СНГ, Китая.

Сборник предназначен для научных сотрудников, инженерно-технических работников, аспирантов и студентов старших курсов машиностроительных специальностей.

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук *А.Ф. Денисенко*,

д-р техн. наук *К.В. Никитин*,

д-р техн. наук *Н.В. Носов*,

д-р техн. наук *С.И. Яресько*,

канд. техн. наук *А.Р. Галлямов*,

канд. пед. наук *Л.Б. Гаспарова*,

канд. техн. наук *Р.Г. Гришин*,

канд. техн. наук *Д.А. Майдан*,

канд. арх. *А.П. Раков*,

канд. техн. наук *О.Ю. Комиссарова* (отв. секретарь)

Рецензенты: д-р техн. наук, и. о. зав. каф. «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств» *И.Д. Ибатуллин*,
главный технолог АО «Агрегат» *А.А. Бочаров*

УДК 621.002(06)

ББК 34я4

В 932

Минимальные системные требования:

Windows XP, Vista, Adobe Acrobat Reader

ISBN 978-5-7964-2511-4

© Авторы, 2026

© Самарский государственный
технический университет, 2026

**Секция 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ
И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ОБОРУДОВАНИЯ
СОВРЕМЕННЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

УДК 531.748

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОКОЛЛИМАТОРА**

Боклаг Ю.Д. , студент, **Иващенко Е.М.**, ассистент, к.т.н.

*Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: yulia.b2002@mail.ru*

Цифровые автоколлиматоры включены в поверочную схему единицы плоского угла в качестве вторичных эталонов, рабочих эталонов 1-го и 2-го разряда, используются для проведения поверок и калибровок высокоточных поворотных устройств: оптических делительных головок и поворотных столов, поэтому исследование их случайной погрешности является актуальной задачей. Представлены результаты анализа случайной погрешности измерений автоколлиматором с помощью вариации Аллана. Отмечено влияние внешних факторов на случайную погрешность автоколлиматора. Проведено сравнение немецкого автоколлиматора TriAngle TA 500-57 и российского автоколлиматора АК-025. Показано, что природа шумов автоколлиматоров разных производителей одинакова.

Ключевые слова: автоколлиматор, вариация Аллана, случайная погрешность автоколлиматора

**METROLOGICAL ASPECT OF OPTICAL CONTROL METHODS
USING AN AUTOCOLLIMATOR**

Boklag Yu.D. , student, **Ivashchenko E.M.**, assistant, PhD in Engineering Sciences

*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russian Federation
E-mail: yulia.b2002@mail.ru*

Digital autocollimators are included in the verification scheme of the plane angle unit as secondary standards, working standards of the 1st and 2nd order, and are used to verify and calibrate high-precision rotary devices: optical dividing heads and rotary tables, so studying their random error is a pressing task. The results of the analysis of the random error of autocollimator measurements using Allan variance are presented. The influence of external factors on the random error of the autocollimator is noted. A comparison of the German TriAngle TA 500-57 autocollimator and the Russian AK-025 autocollimator is carried out. It is shown that the nature of noise in autocollimators from different manufacturers is the same.

Keywords: autocollimator, Allan variance, random error of autocollimator

Современное машиностроение предъявляет строгие требования к точности изготавливаемых деталей, их линейным и угловым размерам, качеству поверхности, их расположению относительно друг друга. Важным этапом производства является контроль этих параметров с помощью измерительного оборудования [1, 2]. Для контроля допусков формы и расположения деталей применяют автоколлиматоры. С их помощью производят контроль малых угловых перемещений, отклонений от параллельности и перпендикулярности. Автоколлиматоры применяются для проведения поверок и калибровок высокоточных поворотных устройств: оптических делительных головок и поворотных столов.

Автоколлиматор и погрешность измерений автоколлиматором

С помощью автоколлиматора (АК) измеряются малые угловые перемещения, отклонения формы и расположения деталей. Согласно утвержденной поверочной схеме, автоколлиматоры играют важную роль в качестве вторичных эталонов, рабочих эталонов 1-го и 2-го разряда при передаче единицы плоского угла. Автоколлиматор как вторичный эталон имеет среднее квадратическое отклонение результатов сличений с первичным эталоном от 0,03 до 0,05" и передает единицу плоского угла:

- рабочим эталонам 1-го разряда – автоколлиматорам методом прямых измерений, поворотным столам методом непосредственного сличения;

- средствам измерений – автоколлиматорам с $\Delta = 0,1\text{--}0,3''$ методом прямых измерений.

Автоколлиматоры, относящиеся к рабочим эталонам 1-го разряда, имеют доверительную границу абсолютной погрешности от 0,1" до 0,3" и передают единицу плоского угла:

- рабочим эталонам 2-го разряда – автоколлиматорам, уровням, экзаменаторам методом прямых измерений;

- рабочим эталонам 3-го разряда – автоколлиматорам методом прямых измерений;

- средствам измерений – автоколлиматорам с $\Delta = 0,3\text{--}3''$, автоколлиматорам визуальным с $\Delta = 0,6\text{--}6,0''$, ампулам уровней и уровням с $\Delta = 0,2\text{--}0,8''$, уровням электронным с $\Delta = 0,2\text{--}20''$, уровням электронным с $\Delta = 0,2\text{--}600''$ методом прямых измерений.

Также они используются при поверке оптических делительных головок, поворотных столов и многогранных призм; при контроле параллельности поверхностей, малых угловых отклонений. Широко используются цифровые автоколлиматоры, которые производят непрерывные измерения, а также осуществляют запись данных. В Госреестре представлен ряд цифровых АК. Их метрологические характеристики приведены в таблице.

Метрологические характеристики цифровых АК

Наименование	Автоколлиматоры цифровые АК		Автоколлиматоры цифровые TriAngle		
Номер Госреестра	96272-25		91214-24		
Производитель	Общество с ограниченной ответственностью «ИНЕРТЕХ»		TRIOPTICS GmbH, Германия		
Модификации	АК-05	АК-025М	ТА 100-38	ТА 500-57	ТА US 300-57
Диапазон измерений углов в горизонтальной плоскости	от -1200" до +1200"		от 0" до 6170"	от 0" до 1240"	от 0" до 2600"
Диапазон измерений углов в вертикальной плоскости	от -900" до +900"		от 0" до 4940"	от 0" до 980"	от 0" до 1700"
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений углов	$\pm 0,50''$	$\pm 0,10''$ (в поддиапазоне измер. от -600" до +600" включ.) $\pm 0,25''$ (в остальных поддиапазонах измер.)	$\pm 2,5''$	$\pm 0,40''$	$\pm 0,050''$ (в поддиапазоне измер. от 0» до 10" включ.) $\pm 0,100''$ (в поддиапазоне измер. св. 10» до 20" включ.) $\pm 0,250''$ (в поддиапазоне св. 20")
Дискретность отсчета	0,01"		0,1"	0,02"	0,01"

В таблице указан предел допускаемой абсолютной погрешности измерений углов, который включает в себя неисключенную систематическую и случайную составляющие погрешности измерений. Допускаемая погрешность во многом определяется случайной погрешностью, источниками которой могут являться как внешние условия, влияние которых не удалось скомпенсировать, а именно перепады температуры в помещении, вибрации, воздушные потоки, нестабильность подаваемого питания, так и внутренние – нагрев электронных компонентов АК. Для минимизации случайной погрешности АК необходимо провести анализ и предположить причины ее возникновения.

Методы исследования случайной погрешности измерений автоколлиматора

Целью работы является исследование случайной погрешности автоколлиматора TriAngle TA 500-57 и ее сравнение с погрешностью АК российского производства. В [3] представлены результаты исследований с АК компании ООО «Инертех». Исследования TriAngle TA 500-57 целесообразно провести в условиях, приближенных к условиям эксперимента [3], и использовать те же методы, а именно вариацию Аллана [4].

Эксперимент и результаты

Немецкий АК TriAngle TA 500-57 состоит из трубы автоколлиматора, регулируемой в двух осях подставки с микромеханическими винтами, соединительного кабеля и ПК со специализированным ПО, предоставляемым производителем. АК TriAngle TA 500-57 имеет предел допускаемой абсолютной погрешности измерений углов, равный $\pm 0,4''$.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. АК (3) размещался на оптическом столе вместе с зеркалом на магнитной подставке (1). Зеркало располагалось перпендикулярно оптической оси АК на расстоянии 20 см. Сначала в поле зрения АК был пойман отраженный от зеркала световой пучок, на экране ПК (4) видна автоколлимационная метка. Далее в ПО к автоколлиматору воспользовались функцией обнуления показаний. Это необходимо, чтобы увидеть значения погрешности в явном виде. Во время проведения эксперимента все приборы были жестко закреплены. Показания с АК снимались в течение 30 минут с частотой 4 Гц. В результате был получен файл с данными, отражающими изменение угла, фиксируемого АК.

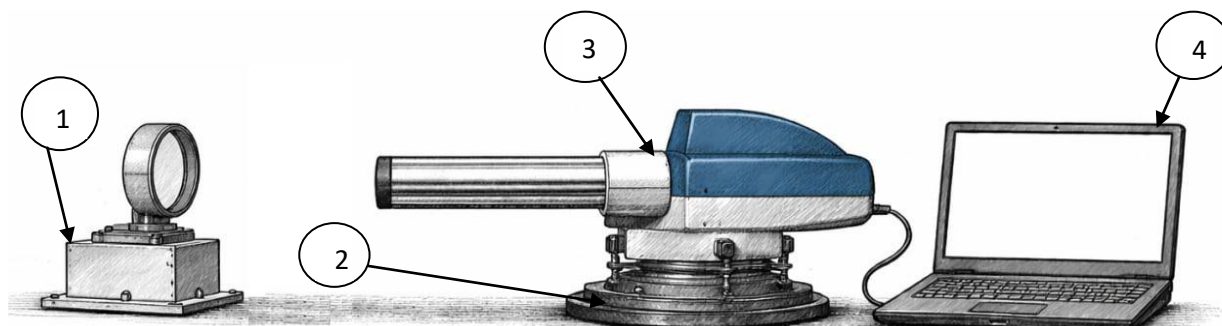


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – зеркало; 2 – регулируемая подставка; 3 – труба АК с электронным блоком; 4 – ПК с ПО

Полученные данные обрабатывались с использованием вариации Аллана. Исходные данные приведены на рис. 2. Полученный график вариации Аллана для оси X представлен на рис. 3.

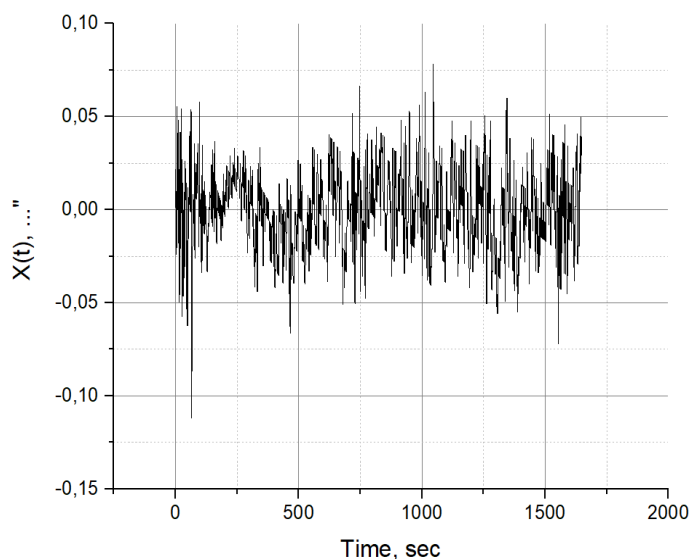


Рис. 2. Исходные данные ось X

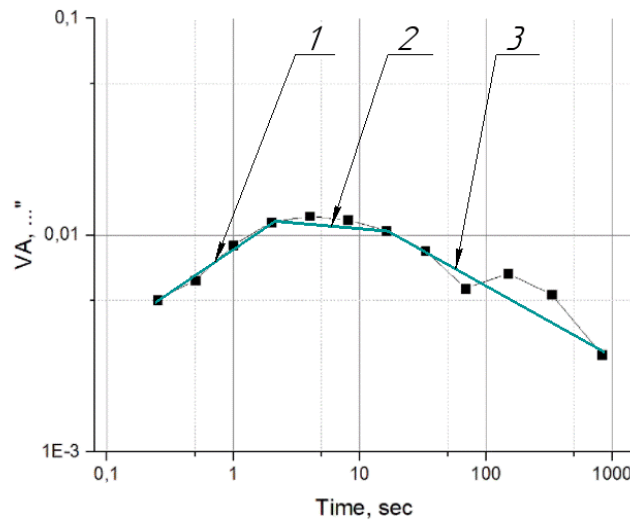


Рис. 3. Вариация Аллана

При анализе графика вариации Аллана можно выделить наклоны с 1 по 3 (см. рис. 3). Эти наклоны имеют значения $\pm 1/2$ и 0. Согласно [5] они соответствуют белому шуму и фликкер-шуму. Случайный процесс, характеризующий случайную погрешность, является нестационарным. Источниками этих шумов могут быть электронные компоненты АК, а также некомпенсированное воздействие внешних условий. В статье [3] проводился подобный анализ для отечественного АК-025, характеристики которого приведены в таблице.

Отметим, что графики вариации Аллана, полученные для автоколлиматора производства ООО «Инертех» [3] и для немецкого АК Triangle TA 500-57, представленного на рис. 3, качественно не отличаются, что свидетельствует об одинаковом составе шумов для немецкого и российского АК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Малкина, И.В. Оптические методы контроля качества геометрических параметров изделий машиностроения / И.В. Малкина // Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции. Уфа, 2025. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2025. – С. 37–42.
2. Гончаров, Н. Обзор современной углоизмерительной техники / Н. Гончаров // Фотоника. – 2014. – № 43. – С. 64–72.
3. Иващенко, Е.М. Предельная точность автоколлиматора-нуль-индикатора / Е.М. Иващенко, Р.А. Ларичев, П.А. Павлов // Измерительная техника. – 2025. – № 2. – С. 64–69.
4. Сирая, Т.Н. Статистическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств / Т.Н. Сирая // Гироскопия и навигация. – Санкт-Петербург: Электроприбор, 2020.
5. IEEE Std 647-2002. IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CMSOLVER ДЛЯ ПОДБОРА ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Буханов С.А., старший преподаватель

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: bukhanov@yandex.ru*

Рассматривается использование программного обеспечения CMSolver для решения задачи формирования конфигурации производственных систем (ПС). Представлены архитектура решателя и способы оптимизации процесса поиска решений. Исследуются алгоритмы поиска решений, реализованные в решателе CMSolver.

Ключевые слова: производственная система, проектирование производственной системы, управление конфигурацией производственной системы, задача удовлетворения ограничений, CSP, CMSolver

USING CMSOLVER SOFTWARE TO SELECT THE MAIN TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Bukhanov S.A., senior lecturer

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
E-mail: bukhanov@yandex.ru*

The use of CMSolver software for solving the problem of forming the configuration of production systems (PS) is considered. The architecture of the solver and ways to optimize the process of finding solutions are considered. Algorithms for finding solutions implemented in the CMSolver solver are being investigated.

Keywords: production system, production system configuration management, constraint satisfaction problem, CSP, CMSolver

В современных условиях задача проектирования производственной системы (ПС) характеризуется рядом особенностей [1, 2]:

- невозможность однозначного определения проектной номенклатуры предполагаемых к производству изделий на этапе проектирования;
- необходимость учета в производстве непрерывно изменяющихся индивидуальных требований потребителя;
- значительное количество вариантов для выбора основного технологического оборудования и средств технологического оснащения.

Для эффективного решения задач проектирования ПС нужен метод, который бы позволял записывать условия задачи вне решающего алгоритма и был бы эффективен для широкого класса ограничений, которые задаются и периодически уточняются проектировщиком.

Одним из предъявляемых к разрабатываемому методу требований является гибкость в расширении и модификации модели задачи. Для выполнения этого требования необходимо обеспечить раздельное описание закономерностей конфигурации производственной системы в зависимости от решающего алгоритма, что обеспечивается в предлагаемом решении через описание задачи в терминах Задачи Удовлетворения Ограничений (CSP).

Описание закономерностей конфигурации ПС основано на моделиориентированном подходе к задаче, представляющей собой систему сложных разнородных ограничений. Выбранный подход позволяет выделить ограничения таким образом, что исходные данные задаются проектировщиком ПС перед решением задачи.

С учетом особенностей проблемной области для выполнения поиска решений необходимы решающие алгоритмы, эффективные на больших комбинаторных пространствах, что реализуется за счет использования стохастических и эвристических методов поиска решений CSP в комбинации с методами CSP распространения ограничений.

Необходимо разработать алгоритмы поиска решений, которые были бы устойчивы к разного рода ограничениям реальных задач и могли бы сохранять работоспособность вне зависимости от вида ограничений.

Для реализации выбранного подхода потребовалось разработать соответствующие метод представления, программную реализацию алгоритмов и методику их применения.

В результате анализа было установлено, что применение готового решателя путем использования встроенного языка описания задачи имеет ряд недостатков. Среди основных следует отметить сложность описания или корректировки отдельных частей задачи специалистом по данному языку. Кроме того, готовые решатели по причине своей универсальности не оптимизированы для решения одной конкретной задачи, в данном случае задачи подбора основного технологического оборудования (ОТО). Модель хранения данных, используемая в готовом решателе, является более абстрактной. Все это вызывает значительное увеличение времени подготовки и отладки модели. Создание решателя, оптимизированного к конкретной задаче, может быть более рациональным по сравнению с применением готовых предлагаемых методов и решений.

Материалы и методы

Разработка собственного решателя позволяет реализовать описание модели задачи и создать необходимые возможности для удобного доступа и коррекции данных задачи [3]. Архитектура решателя задач синтеза конфигурации CMSolver показана на рис. 1.

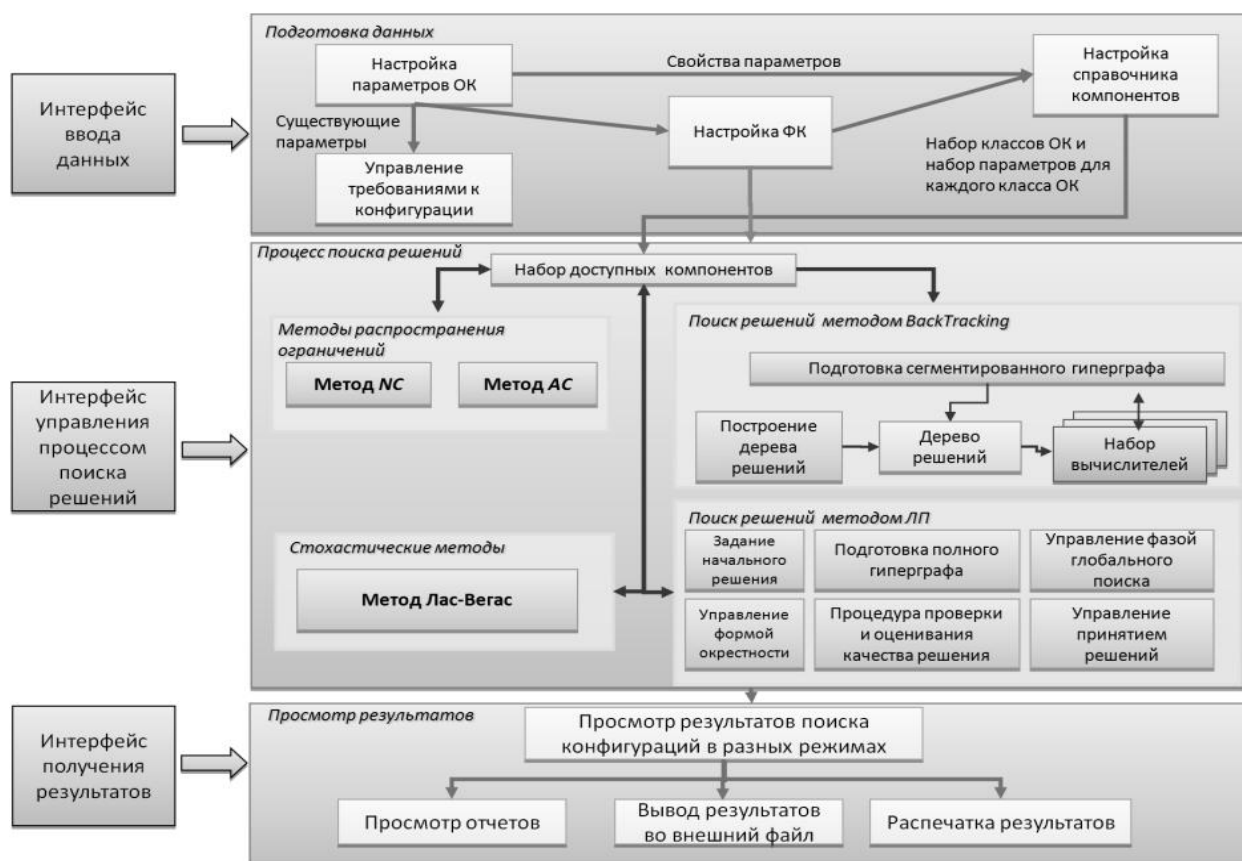


Рис. 1. Архитектура решателя

Важной особенностью предложенной архитектуры программного средства является возможность описывать модель задачи, не прибегая к разработке или модификации программной части на языке программирования. Решатель позволяет описывать модель задачи

посредством специального интерфейса ввода данных в форме единого дерева элементов онтологии задачи, набора выражений ограничений в простой математической форме и таблиц справочников как онтологии предметной области.

Для реализации данного функционала в архитектуру решателя встроены средства предварительной трансляции выражений во внутреннюю объектную форму. В результате успешной трансляции выражения создается синтаксическое дерево, реализуемое в виде иерархической структуры объектов, без привязки к конкретным экземплярам вычисляемых или табличных параметров.

В качестве решающих алгоритмов были реализованы и исследованы три группы методов, показанные на рис. 2.

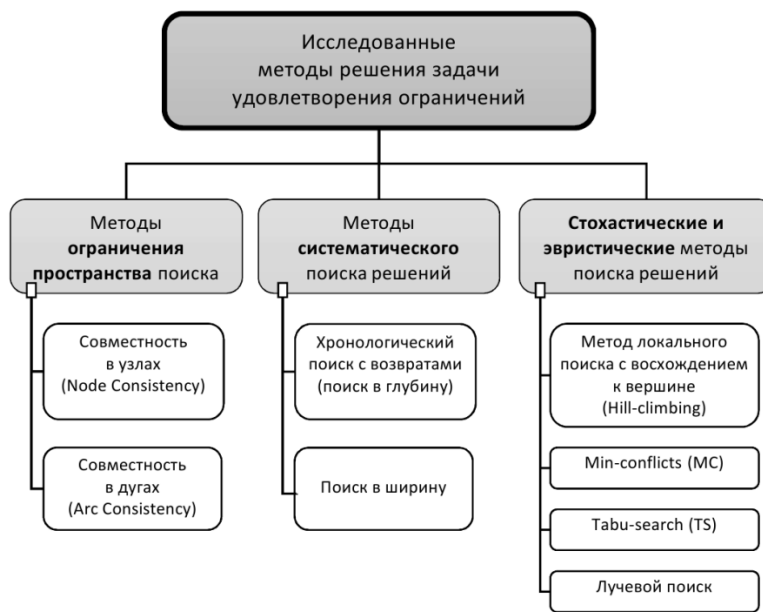


Рис. 2. Исследованные методы решения задачи удовлетворения ограничений для синтеза конфигурации производственной системы

В ходе выполнения алгоритмов решения задачи для каждого выражения ограничения создается свой объект вычислителя. Вычислитель реализует методы разбора выражения ограничения с проверкой синтаксиса, формирования синтаксического дерева выражения, реализует алгоритм встраивания в гиперграф и обеспечивает сам процесс вычисления или проверки условия, определяемого выражением.

Пример результата трансляции выражения ограничения в решателе показан на рис. 3.

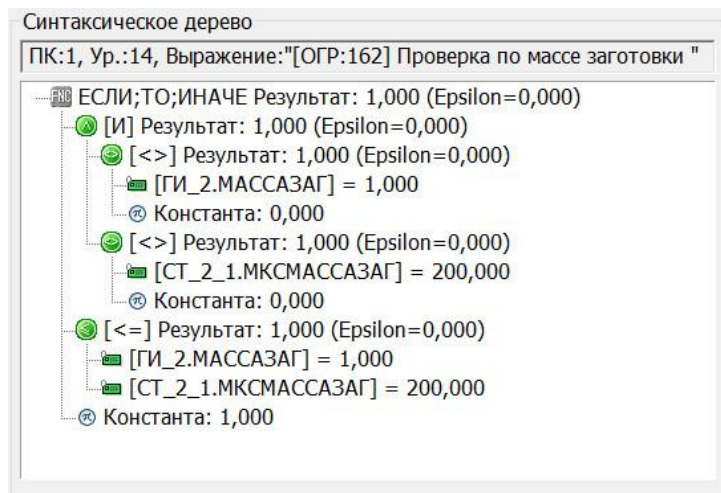


Рис. 3. Представление выражения в решателе

Вычислитель представляет собой унифицированный встроенный модуль, предназначенный для работы с разными типами выражений, используемыми в решателе. Для обработки каждого типа выражения вычислитель переводится в соответствующий режим. Так, ограничения могут реализовываться в объектах вычислителях с режимами: «прямое вычисление выражения», «поиск значения» или «проверка условия требования или ограничения».

Решатель разработан на языке C++ с использованием библиотеки STL для платформы Windows. В решателе реализован функционал для работы на основных этапах решения задачи формирования конфигурации производственной системы:

- функции ввода и редактирования данных модели задачи и справочника компонентов ПС;
- функции отладки выражений ограничений модели;
- функции управления процессом решения задачи и функции обзора полученных результатов.

Решатель предназначен для относительно узкого класса комбинаторных задач, в том числе есть возможность оптимизации процесса поиска решений за счет применения методов быстрого доступа к данным. С этой целью реализованы способы ускорения вычисления и проверки выражений ограничений:

- предварительная трансляция выражений в промежуточную объектную модель;
- быстрая подстановка параметров в выражения за счет использования механизма ссылок на объекты или индексы;
- хранение всех объектов в оперативной памяти;
- использование контейнеров и алгоритмов библиотеки STL для хранения и доступа к объектам в памяти;
- индексирование объектов – сквозное для всех объектов или по классам.

Исследование алгоритмов поиска решений на задачах разной размерности для проектирования конфигурации производственной системы показало эффективность стохастических методов на основе метода локального поиска, подкрепленных методами ограничения пространства поиска. Программное решение было апробировано на нескольких модификациях задачи построения конфигурации участка по изготовлению технологической оснастки для производства резинотехнических изделий [4]. Время получения решения укладывается в интервал от нескольких секунд до 15 минут.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лагута, В.С. Учет неопределенности номенклатуры деталей для выбора качественного состава оборудования ГПС механообработки / В.С. Лагута, М.В. Овсянников // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 18–20 апреля 2023 г. – Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – С. 75–84.
2. Буханов, С.А. Проектирование конфигурации производственной системы на этапах жизненного цикла / С.А. Буханов, В.С. Лагута, М.В. Овсянников // Высокие технологии в машиностроении: материалы ВНТК. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2025. – С. 14–19.
3. Буханов, С.А. Автоматизация формирования конфигурации гибкой производственной системы с использованием ПО CMSolver / С.А. Буханов // Комплексная автоматизация проектирования и производства 2025 (КАПП-2025): Материалы третьей научно-практической конференции с международным участием, Москва, 31 октября 2025 года. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – С. 162–167.
4. Буханов, С.А. Синтез конфигурации производственной системы по изготовлению технологической оснастки для выпуска резинотехнических изделий / С.А. Буханов, В.С. Лагута, Д.С. Резниченко // Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП-2024): Первая научно-практическая конференция с международным участием: материалы конференции – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – С. 41–45.

МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ ЛАЗЕРНЫМ ДАЛЬНОМЕРАМ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ОТ 0 ДО 300 М

Воейко О.А. ✉, зав. каф., к.т.н., доцент, Воейко А.А., магистрант

ТУ им. А.А. Леонова (филиал) МИИГАиК, г. Королев, Российская Федерация
E-mail: voeiko@ut-mo.ru

Проведен анализ существующего парка лазерных дальномеров, методов и средств их поверки. Предложен метод, позволяющий проводить исследования метрологических характеристик и осуществлять передачу единицы длины лазерным дальномерам в диапазоне длин от 0 до 300 м.

Ключевые слова: лазерные дальномеры, метод передачи единицы длины, поверка

A METHOD OF A LENGTH UNIT TRANSFER TO LASER RANGEFINDERS IN THE 0–300 M LENGTH RANGE

Voeiko O.A. ✉, Head of the Department, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Voeiko A.A., Master's Degree student

A.A. Leonov Technical University (branch) MIIGAiK, Korolev, Russian Federation
E-mail: voeiko@ut-mo.ru

The analysis of the existing park of laser rangefinders, methods and means of their verification is carried out. The method is proposed, allowing to carry out research of metrological characteristics and to carry out the transfer of the unit of length to laser rangefinders in the range of lengths from 0 to 300 m.

Keywords: laser rangefinders, method of length unit transfer, verification

В настоящее время значительно увеличилось количество эксплуатируемых лазерных дальномеров, а также расширилась сфера их применения. Особенно широкое распространение получили дальномеры, которые в повседневной деятельности многие привыкли называть «лазерная рулетка» (рис. 1).



Рис. 1. Дальномеры лазерные

Данный тип дальномеров используется в геодезии, строительстве, при эксплуатации инженерных сооружений и других сферах деятельности. Лазерные дальномеры удобны в эксплуатации и обращении. За счет повышения точности измерений производителями некоторые типы лазерных дальномеров постепенно начинают использоваться в сфере обес-

печения единства измерений также в качестве эталонных средств при поверке рабочих средств измерений. Основной метрологической характеристикой лазерных дальномеров является средняя квадратическая погрешность измерений расстояний, которая на сегодняшний день составляет порядка $\pm 1,0$ мм, эффективный диапазон измерений до 250 м.

На сегодняшний день в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (далее ФИФ) зарегистрировано свыше 60 типов лазерных дальномеров. Ведущими производителями лазерных дальномеров являются: Leica Geosystems AG, Швейцария; Robert Bosch GmbH, Германия; Nikon Vision Co., Ltd., Япония; Fluke Corporation, США.

При анализе парка лазерных дальномеров было выявлено, что у подавляющего большинства дальномеров в соответствии с описанием типа методика поверки приводится в руководстве по эксплуатации. Однако во входящем в комплект дальномера руководстве по эксплуатации данный раздел отсутствует. В других случаях указываются методики организаций, проводивших испытания с целью утверждения типа средства измерений, но сведения о данных методиках в открытых источниках информации отсутствуют, также они не включены в комплект поставки дальномера.

В разделе «Средства поверки» подавляющего большинства описаний типа на дальномеры лазерные указаны следующие варианты средств поверки:

- контрольные линии (не менее трех), длины которых равномерно располагаются в диапазоне измерения дальномеров и определены с погрешностью не более $\pm 0,3$ мм;
- светодальномер типа СП (светодальномер, применяемый в прикладной геодезии) или рулетка 3-го разряда.

В единичных случаях указываются эталонный линейный базис 1-го разряда или система лазерная измерительная ML10.

При применении данных средств поверки возникают следующие вопросы:

- в случае использования контрольных линий, определенных с погрешностью не более $\pm 0,3$ мм, необходимы сведения об эталонном оборудовании, с помощью которого данные линии определены, а также, учитывая, что диапазон измерений некоторых дальномеров лазерных превышает 200 м, поверка возможна только в полевых условиях или специализированных сооружениях. Соответственно, для выполнения таких условий наличия одного эталонного дальномера недостаточно, необходимы геодезические штативы, визирные цели, вспомогательное оборудование и дополнительные приспособления. Те же условия необходимо выполнять в случае применения светодальномеров типа СП, которые на сегодняшний день являются большой редкостью, отечественной промышленностью не выпускаются и в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений отсутствуют;
- применение рулетки 3-го разряда при поверке лазерного дальномера в принципе недопустимо, тем более – при поверке в полевых условиях.

Лазерные дальномеры по принципу действия реагируют непосредственно на оптическую длину пути, который проходит лазерный луч в атмосфере. Среднее интегральное значение показателя преломления воздуха приземного слоя атмосферы на траектории лазерного луча зависит от длины волны излучения лазера, конфигурации полей температуры, давления и влажности воздуха, его молекулярного состава и других величин [1]. Оно определяется путем измерения метеорологических характеристик – температуры, давления и влажности воздуха. Фактические метеорологические данные необходимо учитывать, чтобы вывести поправки на атмосферу, которые необходимо вводить в первоначальные измерения расстояний [2, 3]. Данный вопрос организациями, проводившими испытания с целью утверждения типа средства измерений, не освещается.

Отдельные типы лазерных дальномеров оснащены акселерометрами, с помощью которых измеряются вертикальные углы в диапазоне от 0 до 360° с погрешностью измерений угла $\pm 0,3^\circ$. В качестве средства поверки в большинстве описаний типа на дальномеры лазерные со встроенными акселерометрами указан квадрант оптический КО-60. Для определения погрешности измерения вертикальных углов квадрант и дальномер необходимо установить на поверхность, вращающуюся вокруг оси $0-360^\circ$ и обеспечивающую надежное крепление

квадранта и дальномера. Сведения о возможных технических устройствах, приспособлениях или средствах измерений в разделе «Средства поверки» для определения погрешности измерения вертикального угла отсутствуют. Наличие квадранта оптического КО-60 не позволяет определить погрешность акселерометра во всем его диапазоне, так как диапазон квадранта КО-60 составляет $\pm(0-120)^\circ$.

Для проведения поверки дальномеров лазерных был разработан метод, позволяющий определять метрологические характеристики лазерных дальномеров с использованием рабочего эталона 1-го разряда – тахеометра электронного (номер ФИФ, № 31709-06), оптической делительной головки ОДГЭ-5 и вспомогательных устройств.

Диапазон и погрешность встроенного акселерометра лазерных дальномеров предлагается определять с помощью оптической делительной головки ОДГЭ-5. Также для определения метрологических характеристик встроенных акселерометров возможно применение прибора для поверки квадрантов ППК (номер ФИФ, № 51161-12).

Разработанный метод передачи единицы длины лазерному дальномеру предполагает использование образцовых длин линий, действительные значения которых определены по результатам измерений эталонного дальномера (рис. 2). Поверяемый дальномер (далее ПД) устанавливается на эталонном дальномере (далее ЭД), установленном на геодезическом штативе, при помощи специально разработанного автором приспособления для поверки дальномеров лазерных (рис. 3).

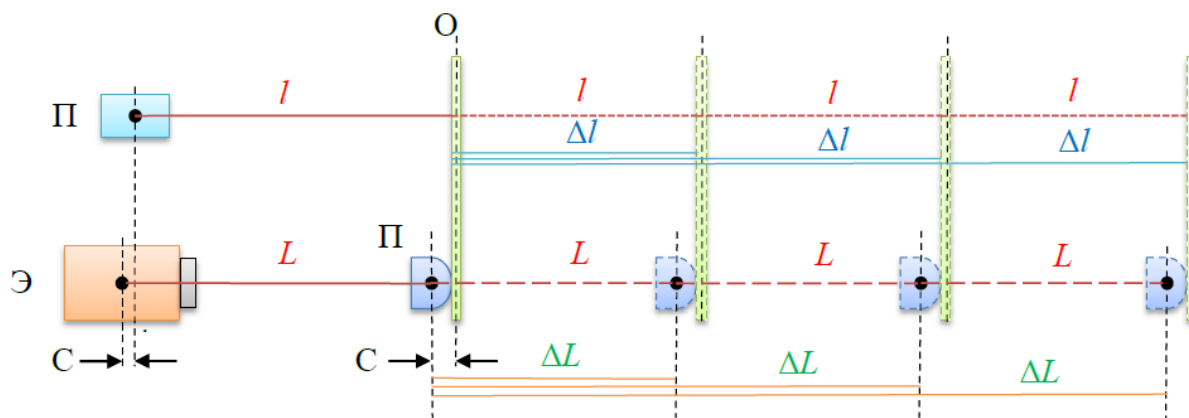


Рис. 2. Схема передачи единицы длины лазерному дальномеру:

ПД – проверяемый лазерный дальномер; ЭД – эталонный дальномер;

ПО – призматический отражатель; ОП – отражающая поверхность;

C_1 – величина несовмещения центров ЭД и ПД; C_2 – величина несовмещения центров ПО и ОП;

$L_0...L_3$ – расстояния, измеренные ЭД до ПО; $l_0...l_3$ – расстояния, измеренные ПД до ОП;

$\Delta L_1... \Delta L_3$ – образцовые контрольные линии; $\Delta l_1... \Delta l_3$ – измеренные контрольные линии ПД



Рис. 3. Лазерный дальномер закрепленный установлен на эталонном дальномере с помощью приспособления для поверки дальномеров лазерных

Разработанное приспособление для поверки лазерных дальномеров позволяет устанавливать на эталонном дальномере все виды лазерных дальномеров указанных выше разработчиков.

За образцовые контрольные линии $\Delta L_1 \dots \Delta L_3$ принимаются рассчитанные по результатам серий измерений эталонным дальномером расстояний (не менее 10) до ПО. ПО и ОП жестко образуют единую отражающую систему, установленную на геодезическом штативе, с возможностью регулировки по высоте для исключения углового расхождения, приводящего к введению дополнительной погрешности.

ОП окрашена в белый цвет, так как белый цвет обладает наибольшими отражающими свойствами. Одновременно с измерениями расстояний производятся измерения метеопараметров в начале и конце линии с помощью установленных на штативах метеостанций.

Результатами обработки измерений являются (K):

– приборная поправка дальномера:

$$K = L_{\text{ЭТ}} - l_{\text{ИЗМ}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{ЭТ}}$ – образцовая линия;

$l_{\text{ИЗМ}}$ – значение длины линии, полученное из измерений поверяемым прибором;

– средняя квадратическая погрешность измерения расстояний:

$$m_D = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^2}{n}}, \quad (2)$$

где Δ_i – разность между результатами измерений i -й контрольной линией и ее действительным значением.

Рассмотрим порядок расчета образцовых контрольных линий.

Образцовые контрольные линии рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &= L_1 - L_0; \\ \Delta L_2 &= L_2 - L_0; \\ \Delta L_3 &= L_3 - L_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Контрольные линии, измеренные ПД, рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} \Delta l_1 &= l_1 - l_0; \\ \Delta l_2 &= l_2 - l_0; \\ \Delta l_3 &= l_3 - l_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Приборные поправки дальномера для каждой контрольной линии определяются по формулам

$$\begin{aligned} K_1 &= \Delta L_1 - \Delta l_1; \\ K_2 &= \Delta L_2 - \Delta l_2; \\ K_3 &= \Delta L_3 - \Delta l_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Расстояния L_0 и l_0 образуют опорное плечо, позволяющее исключить влияние величин C_1 и C_2 на результаты измерений. При обработке результатов измерений необходимо учитывать поправки на метеоусловия. Таким образом, получены расчетные соотношения передачи единицы длины лазерным дальномерам с использованием эталонного дальномера.

Экспериментальные исследования разработанного метода проведены для лазерных дальномеров: Bosch GLM 250 VF; Leica DISTO D510; Nikon Laser 800, результаты исследований представлены в таблице.

Результаты экспериментальных исследований показали, что значение суммарной погрешности измерений расстояний лазерным дальномером, определенной разработанным методом с использованием эталонного дальномера, не превысили допускаемых значений, установленных описанием типа на лазерный дальномер.

Результаты экспериментальных исследований разработанного метода

Длина образцовой контрольной линии, м	Bosch GLM 250 VF		Leica DISTO D510		Nikon Laser 800	
	СКП измерений расстояний, мм		СКП измерений расстояний, мм		СКП измерений расстояний, мм	
	из НТД	полученное	из НТД	полученное	из НТД	полученное
9,96	±1,4	0,6	1,0	0,7	±0,5	минус 0,2
101,52	±6,0	2,4	30,5	3,8	±2,5	1,3
199,84	±10,9	6,1	60,0	7,7	±2,5	2,2

Таким образом, разработан и апробирован метод, позволяющий передать единицу длины лазерным дальномерам с использованием рабочего эталона 1-го разряда и установить прослеживаемость к вторичному эталону единицы длины. Направлением дальнейших исследований будет являться исследование влияний атмосферных факторов на точность измерений и передачу единицы длины лазерным дальномерам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрусенко, А.М. Анализ методов учета влияния атмосферных условий на точность лазерных дальномерных измерений / А.М. Андрусенко. – Москва: Измерительная техника, 1981. – 26 с.
2. Голубев, А.Н. Лазерная интерферометрия больших расстояний / А.Н. Голубев, В.А. Ханов. – Москва: Недра, 1991. – 78 с.
3. Вшивкова, О.В. О характере и степени влияния приземного слоя атмосферы на точность спутниковых определений и учете этого влияния / О.В. Вшивкова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 2. – С. 21–33.

ГЕНЕРАТИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

Денисенко А.Ф., д.т.н., профессор, Ладягин Р.В.✉, аспирант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

Статья посвящена применению генеративного проектирования к созданию шпиндельных узлов металлорежущих станков. Авторами предложена схема, основанная на взаимодействии проектировщика и программ нейросетевого расчета, которые генерируют и анализируют множество возможных вариантов проектных параметров.

Ключевые слова: генеративное проектирование, шпиндельный узел, эксплуатационные характеристики, проектные параметры

GENERATIVE DESIGN OF SPINDLE UNITS

Denisenko A.F., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Ladyagin R.V.✉, PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

The article is devoted to the application of generative design to the creation of spindle units of metal-cutting machines. The authors propose a scheme based on the interaction between the designer and neural network calculation programs, which generate and analyze a variety of possible design parameters.

Keywords: generative design, spindle unit, performance characteristics, design parameters

Шпиндельный узел (ШУ) – один из наиболее ответственных узлов станка, на долю которого приходится 50–80 % погрешностей в общем балансе точности станка [1]. Его качественные показатели должны закладываться уже на этапе проектирования.

До недавнего времени (начало 2000-х годов) при проектировании станков использовался классический (детерминированный) подход, основанный на строгой последовательности этапов: постановка задачи → анализ → синтез решений → оценка и выбор → детализация. Основная идея данного подхода – сведение сложной задачи к совокупности простых, решение которых приводит к оптимальному результату на основе инженерных расчетов и логики. При этом проектировщик в основном опирался на стандарты, нормативы и прошлый опыт и принимал все ключевые решения.

Анализ тенденций развития проектирования в различных научно-технических областях показал растущий интерес к технологиям генеративного проектирования. Это в первую очередь связано с бурным развитием компьютерной сферы и расширением применения нейросетей. Первые работы по генеративному проектированию появились относительно недавно – в начале 2000-х годов [2].

На основе обзора литературы [3–7] можно дать определение понятию генеративного проектирования и выделить присущие ему черты.

Генеративное проектирование – современный подход, при котором инженер задает цели, ограничения и материалы, а специальное программное обеспечение (часто на основе искусственного интеллекта и эволюционных алгоритмов) автоматически генерирует множество альтернативных концепций, которые человек затем анализирует и выбирает оптимальное решение.

Основные особенности классического и генеративного проектирования по различным критериям приведены в таблице.

Особенности классического и генеративного проектирования

Критерий	Рациональное проектирование	Генеративное проектирование
Основная цель	Найти логичное, работоспособное решение	Исследовать множество нетривиальных решений, созданных ИИ
Процесс	Линейный, этапный	Эволюционный, алгоритмический поиск в облаке
Роль человека	Конструктор – главный создатель и эксперт	Конструктор – «куратор», задающий цели и выбирающий из вариантов
Результат	Одно или несколько явных решений	Множество альтернативных, часто неочевидных концепций
Математическая основа	Логика, эвристика, расчеты	Эволюционные алгоритмы, машинное обучение, топологическая оптимизация

Целью данной статьи является разработка методологии процесса генеративного проектирования ШУ.

В генеративном проектировании ответственное лицо непосредственно не ищет решения, а описывает параметры задачи и ее ограничения программе, после чего система генерирует варианты решения. В отличие от традиционных инструментов проектирования, генеративные системы полуавтономно создают и первично отбирают варианты решений, что изменяет характер взаимодействия человека с системой: программа воспринимается не как инструмент, а как полноценный участник процесса создания чего-то нового и уникального [8]. Некоторые системы генеративного проектирования позволяют пользователю уточнить, скорректировать или переформулировать задачу по промежуточным результатам, а также они самообучаются и совершенствуются в процессе поиска решений, как это делают нейросети в процессе своей работы.

Для достижения поставленной цели авторами разработаны программные продукты для назначения (генерации) проектных параметров ШУ (Neural GenSpU) и моделирования его эксплуатационных характеристик (ЭХ) (Neural SpU) [9]. Алгоритм работы этих программ основан на использовании нейросетей.

Рассмотрим предлагаемую методологию проектирования ШУ (см. рисунок). Проектирование начинается с технического задания (ТЗ) и оканчивается техническим проектом. Методология проектирования ШУ предполагает три функциональные схемы:

- проектирование без участия компьютерных программ генерации данных (средняя ветвь). Это классическое проектирование, где от ТЗ до технического проекта ведутся расчеты лицом, принимающим решение (ЛПР), по апробированным методикам (аналитические расчеты и численное моделирование) и накопленному опыту предшественников;

- проектирование с использованием программы нейросетевого прогнозирования ЭХ ШУ (Neural SpU – программы поддержки инженерных решений). При таком подходе расчет выходных показателей (ЭХ) ведется параллельно ЛПР (средняя ветвь) и программой Neural SpU (левая ветвь). Здесь у ЛПР появляется возможность сравнивать результаты своего расчета с расчетами программы, в которой можно их быстро пересчитывать, меняя проектные параметры. Таким образом, ЛПР получает сводную таблицу вариантов ЭХ ШУ и соответствующих им проектных параметров (ПП), откуда, руководствуясь определенным критерием (критериями), выберет подходящий и сравнит со своим вариантом расчета. В случае если ЛПР устроит полученный результат, он переходит к составлению технического проекта. В противном случае возвращает его на уточнение и доработку;

- генеративное проектирование ШУ на основе требуемых ЭХ в зависимости от сгенерированных ПП. При таком проектировании к уже рассмотренным ветвям добавляется правая ветвь – программа нейросетевого назначения (генерации) ПП (Neural GenSpU). Она позволяет ЛПР исключить или взаимодополнить этап обоснования ПП путем их генерации по интегральным параметрам, приведенным в ТЗ. К примеру, такими параметрами могут

служить определяемые стандартами точность вращения шпинделя и размеры его переднего конца. В случае ввода нескольких предполагаемых интегральных параметров будет получена сводная таблица ПП аналогично тому, как это осуществляется при использовании Neural SpU в левой ветви. То есть у ЛПР снова возникает возможность выбора из нескольких вариантов. После назначения ЛПР (либо программой Neural GenSpU) варианта ПП для них производится детальный расчет ЭХ, который, как было указано выше, ведется ЛПР и программой Neural SpU параллельно.

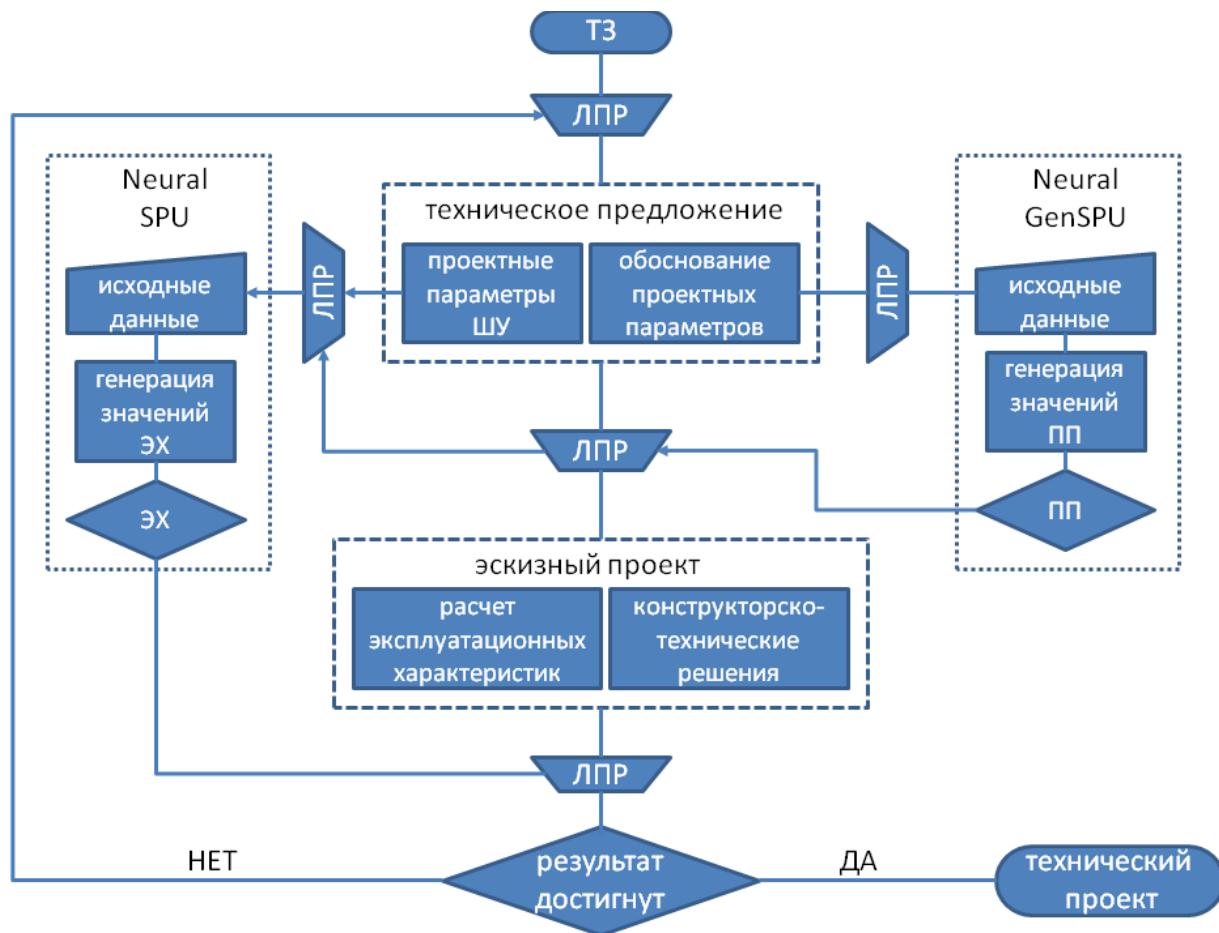


Схема генеративного проектирования ШУ

Из схемы на рисунке видно, что на протяжении всего расчета ЛПР несколько раз сравнивает свои результаты с результатами программ генерации данных (ПП и ЭХ), отвергает, смешивает или усредняет их и, проводя повторный расчет ЭХ по вновь скорректированным ПП, уточняет ЭХ. То есть в процессе своего взаимодействия программы генерации данных (Neural SpU и Neural GenSpU) и ЛПР постоянно будут «подсказывать» друг другу исходные данные, давшие в предыдущем варианте расчета наилучшие ЭХ, и тем самым постоянно сужать область принимаемых решений, получая все более обоснованные значения ПП. Для реализации схемы такого итеративного процесса необходимо после каждого нового (отличного) результата, полученного при совместной работе ЛПР и программ генерации ПП и ЭХ, повторно обучать каждую из них с учетом результатов другой. В случае же исключения обучения сетей новыми полученными результатами необходимость использования программы Neural GenSpU (назначения ПП) возникает лишь единожды – при предварительной оценке ПП.

Основная идея предложенной методологии проектирования заключается в «сотрудничестве» между проектировщиком и компьютерными программами на основе НС, которые взаимодополняют друг друга определенными возможностями. С одной стороны – сортировка больших объемов данных, генерация и анализ большого количества результатов, поиск

оптимальных решений и итеративное улучшение решения. С другой стороны – реальный опыт, глубокие знания, понимание проблематики данной области. Алгоритм (НС), получив четко сформулированную задачу, может перебрать десятки и сотни вариантов решений, которые человек физически не мог бы рассмотреть, и предложить более эффективные и зачастую неочевидные конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пуш, А.В. Шпиндельные узлы: качество и надежность / А.В. Пуш. – Москва: Машиностроение, 1992. – 287 с.
2. Generative Design Methodology and Framework Exploiting Designer-Algorithm Synergies / L. Gradišar; R. Klinc, Ž. Turk, M. Dolenc [Electronic resource] // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – 2194. – URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12122194>
3. Морозов, С.А. Анализ существующего опыта генеративного проектирования / С.А. Морозов, О.А. Тарасова // Наука и Технологии – 2024: сборник статей III Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 06 мая 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2024. – С. 105–113.
4. Алексеев, В.Ф. Определение целевых функций и их ограничений в задачах оптимизации при генеративном проектировании / В.Ф. Алексеев, Д.В. Лихачевский, Г.А. Пискун // BigData и анализ высокого уровня: сборник научных статей XI Международной научно-практической конференции, Минск, 23–24 апреля 2025 года. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2025. – С. 487–494.
5. Использование генеративного искусственного интеллекта для инженерного концептуального проектирования / Т.Г. Коржнева, С.Б. Туранов, К.П. Толкачева, Е. Ф. Полисадова // Интеллектуальная энергетика: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 12–14 ноября 2024 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 294–296.
6. Нугуманов, Р.А. Алгоритмы генеративного проектирования, применяемые в современных работах / Р.А. Нугуманов // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. – 2024. – № 1. – С. 586–589.
7. Берсанов, М.Д.А. Генеративное проектирование в машиностроении / М.Д.А. Берсанов, З.А. Джабраилов, И.А. Магомедов // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 98–11. – С. 184–185. – DOI: 10.18411/trnio-06-2023-651.
8. Кошман, В.Д. Перспективы применения технологии генеративного дизайна в проектировании / В.Д. Кошман // Электронные системы и технологии: сборник материалов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18–22 апреля 2022 года. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022. – С. 827–829.
9. А.с. № 2025684072. Neural SpU. Программа нейросетевого прогнозирования для расчета эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов / Денисенко А.Ф., Ладагин Р.В. – № 2025684072; заявлено 16.07.2025; опубликовано 11.09.2025.

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Елистратов К.М. , аспирант, Рогожников И.А., аспирант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: kirillelistratov2000@gmail.com

Рассмотрено влияние характеристик смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) на качество поверхности при шлифовании жаропрочных сплавов. Проанализированы механизмы воздействия состава, свойств и способа подачи СОТС на шероховатость и возникновение термических дефектов. Особое внимание уделено сравнению эффективности масляных и водосмешиваемых СОТС, а также преимуществ высоконапорной подачи для подавления прижогов. Показана необходимость системной оптимизации состава и гидродинамики потока СОТС для обеспечения стабильного качества обработки.

Ключевые слова: шлифование, жаропрочные сплавы, СОТС, шероховатость, прижог, высоконапорная подача, качество поверхности

THE INFLUENCE OF THE CHOICE OF LUBRICATING AND COOLING PROCESS MEDIA ON THE SURFACE QUALITY DURING GRINDING

Elistratov K.M. , PhD student, Rogozhnikov I.A., PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: kirillelistratov2000@gmail.com

This paper explores the influence of the characteristics of lubricating and cooling process media (COFS) on the surface quality when grinding heat-resistant alloys. The mechanisms of the effect of the composition, properties, and method of supplying STS on roughness and the occurrence of thermal defects are analyzed. Special attention is paid to comparing the effectiveness of oil and water-miscible CTS, as well as the advantages of a high-pressure supply for suppressing burns. The necessity of system optimization of the composition and hydrodynamics of the STS flow is shown to ensure stable processing quality.

Keywords: grinding, heat-resistant alloys, STS, roughness, cauterization, high-pressure feed, surface quality

Шлифование является критически важной финишной операцией в производстве ответственных деталей из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов, таких как ЖС30-ВИ, ЖС6Ф-ВИ. Эти материалы характеризуются низкой теплопроводностью, повышенной прочностью при высоких температурах и склонностью к наклепу, создают экстремальные условия в зоне резания, приводящие к интенсивному тепловыделению. Формируемые при этом температура и силовые нагрузки напрямую определяют два взаимосвязанных аспекта качества: микрорельеф поверхности (шероховатость) и целостность поверхностного слоя. Превышение критических температурных порогов ведет к возникновению недопустимых дефектов – структурных прижогов, отпуска, остаточных растягивающих напряжений и микротрещин, выступающих концентраторами напряжений и снижающих усталостную прочность детали.

Основным технологическим инструментом управления тепловыми и силовыми режимами шлифования выступает применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС). Эффективная подача охлаждающей жидкости важна для обеспечения высокого качества готовой детали, а также высокой скорости удаления материала [1]. Однако на практике выбор и применение СОТС часто носят эмпирический характер. В частности, смена типа или марки СОТС (например, переход между продуктами на разной основе или от раз-

ных производителей) может привести к резкой дестабилизации процесса, проявляющейся в ухудшении качества поверхности и учащении случаев термического брака. Это свидетельствует о недостаточном учете комплексного влияния как физико-химических свойств СОТС, так и гидродинамических параметров ее подачи. Естественно, разработать рекомендации по выбору СОТС, учитывающие все эти факторы, практически невозможно. В известных рекомендациях выбор СОЖ для операций абразивной обработки поставлен, как правило, в зависимость от двух факторов – материала подлежащей обработке заготовки и вида обработки резанием, причем оба фактора задают обычно в самой общей форме... Следовательно, и технологическая эффективность одного и того же СОТС при обработке заготовок из различных материалов одной группы обрабатываемости может быть существенно различной [2].

Важность проблемы рационального применения СОТС определяется не только экономическими соображениями, хотя по оценкам специалистов и опыту промышленности затраты на СОТС часто значительно (до 4 раз) превышают расходы на режущие инструменты и достигают 17 % себестоимости изготовления деталей машин. В то же время СОТС являются загрязнителями окружающей среды, а на их изготовление затрачивают значительное количество дефицитного сырья. Совершенствование техники и технологии применения СОТС будет способствовать переходу машиностроения на ресурсосберегающее экологически чистое производство [2].

Целью данной работы является систематизация современных научных представлений о механизмах влияния ключевых характеристик СОТС – состава, свойств и способа подачи – на формирование шероховатости и возникновение термических дефектов при шлифовании жаропрочных сплавов. Акцент делается на выявлении причинно-следственных связей, позволяющих перейти от эмпирического подбора к обоснованной оптимизации процесса.

Проведенный анализ влияния характеристик СОТС на процесс шлифования показал, что эффективность СОТС определяется выполнением четырех основных функций: охлаждение, смазывание, удаление стружки и минимизация коррозии. Эти критерии оказывают большое влияние на температуру процесса, усилие шлифования, структуру поверхности заготовки и износ инструмента [3]. При обработке жаропрочных сплавов первые две функции являются доминирующими для достижения качества:

1) охлаждение. Способность эффективно отводить тепло определяет максимальную температуру в зоне контакта. Превышение критического значения (обычно 400–550 °С для многих никелевых сплавов) запускает механизмы окисления, отпуска и фазовых превращений, визуально идентифицируемых как прижог. Шероховатость при этом также ухудшается из-за разупрочнения материала и его пластического течения;

2) смазывание. Снижение трения между абразивным зерном и материалом заготовки минимизирует силу резания и, соответственно, мощность, преобразуемую в тепло. Наличие эффективных противозадирных (EP) и противоизносных (AW) присадок в составе СОТС обеспечивает формирование граничных слоев, предотвращающих схватывание и микросварку. Ухудшение смазывающих свойств ведет к росту сил резания, вибрациям и увеличению шероховатости из-за отрыва частиц материала.

Исследования выявляют различные эффекты от применения СОТС на разной основе:

1) СОТС на масляной основе обеспечивают высочайшую смазывающую способность и стабильность в широком диапазоне температур. Это приводит к минимальным силам резания, что часто обуславливает достижение наилучших значений шероховатости (Ra) и снижает риск прижога за счет уменьшения теплогенерации. Недостатками являются высокая цена, сложность очистки деталей и экологические риски;

2) водосмешиваемые эмульсии (синтетические, полусинтетические) обладают превосходной охлаждающей способностью благодаря высокой удельной теплоемкости воды. Однако их смазывающие свойства, обеспечиваемые эмульгаторами и присадками, как правило, уступают маслам. Критическим фактором является стабильность эмульсии: изменение концентрации, «старение» (гидролиз, бактериологическое разложение), загрязнение посторонними ионами (например, хлоридами) резко ухудшают как охлаждающие, так и смазывающие

характеристики, что является типичной скрытой причиной внезапного появления дефектов при использовании вроде бы аналогичных продуктов. Для системного контроля и поддержания стабильности водосмешиваемых СОТС необходим мониторинг ряда физико-химических параметров. Их отклонение от нормы, как показано в таблице, напрямую влияет на качество обработки и состояние оборудования.

**Влияние отклонения основных параметров водосмешиваемых СОТС
от нормы на технологический процесс и оборудование**

Параметр	Ниже нормы	Норма	Выше нормы
Кислотность (рН)	износ инструмента; коррозия стали; нестабильность эмульсии; неприятный запах; размножение бактерий; появление биопленки	8,5–9,5	коррозия алюминия; более агрессивен к коже; повреждение окраски; тенденция пенообразования; разрушение пластика и резины
Жесткость (dH)	пенообразование (мягкая пена)	8–45	коррозия алюминия; расслоение эмульсии; солевые отложения; масляный осадок на поверхностях; снижение ресурса эмульсии
Концентрация (%)	снижение рН; неприятный запах; износ инструмента; нестабильность эмульсии; коррозия стали	6–10	пенообразование; агрессивное воздействие на кожу; подгорание масла, дым; появление осадка; высокий расход концентрата
Проводимость (χ)	–	До 7 мСм/см	повышенное содержание солей; электрохимическая коррозия

Таким образом, поддержание регламентированных значений параметров эмульсии является обязательным условием для реализации ее потенциальных охлаждающих свойств и предотвращения непредсказуемого брака.

Наибольший резерв повышения эффективности СОТС лежит в области оптимизации ее доставки в зону резания. При подаче СОЖ по внешним трактам увеличению ее расхода через зону контакта шлифовального круга с заготовкой препятствуют воздушные потоки, генерируемые вращающимся кругом и создающие в зоне контакта «воздушный клин», давление воздуха в котором может достигать 84 кПа [4].

Традиционная подача затоплением при низком давлении (3–6 бар) часто оказывается неэффективной для обработки жаропрочных сплавов. Основной поток жидкости отбрасывается периферией круга, не проникая в клиновую зону максимального тепловыделения между зерном и заготовкой. Фактическое охлаждение происходит уже после выхода стружки из зоны контакта.

Высоконапорная подача СОТС с давлением 10–20 бар и выше признана наиболее результативным методом. Высокоскоростная ламинарная струя пробивает «воздушный клин» и обеспечивает доставку хладагента непосредственно к абразивному кругу. Это позволяет снизить температуру в зоне резания на 30–50 %, что радикально уменьшает вероятность прижогов и позволяет повысить производительность.

Оптимизация конфигурации подачи и ее эффективность зависят от геометрии и расположения сопел. Согласно данным моделирования и экспериментов, максимальный эффект достигается при направлении сфокусированной струи тангенциально против вращения круга в точку его входа в контакт с заготовкой. Использование нескольких сопел, направленных как на круг, так и в зону контакта, является минимально необходимой мерой, но без обеспечения достаточного давления и точной наводки ее эффективность ограничена.

Проведенный анализ литературных данных о комплексном влиянии СОТС на качество поверхности при шлифовании жаропрочных сплавов позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

1. Качество обработки (шероховатость и отсутствие прижогов) определяется эффективностью теплового и силового режима в зоне резания, который ключевым образом управляется параметрами СОТС.

2. Выбор состава СОТС представляет собой компромисс между смазывающей (преимущество масел) и охлаждающей (преимущество водных эмульсий) способностями. Критическим аспектом является обеспечение стабильности выбранной СОТС в течение всего срока ее службы, так как деградация свойств ведет к непредсказуемому росту брака.

3. Способ подачи зачастую оказывает большее влияние на результат, чем химический состав СОТС. Переход от традиционной низконапорной подачи к высоконапорной (high pressure coolant) является наиболее действенной технологической мерой для подавления термических дефектов и стабилизации процесса. Эффективность метода обусловлена гарантированным преодолением «воздушного клина» и доставкой хладагента непосредственно в очаг теплогенерации.

4. Для достижения стабильного высокого качества необходима системная оптимизация пары «состав СОТС – гидродинамика потока». Это требует как контроля физико-химических свойств применяемой жидкости (вязкость, смазывающая способность, стабильность), так и инженерной настройки системы подачи (давление, производительность насоса, геометрия и позиционирование сопел).

Таким образом, переход от эмпирического использования СОТС к научно обоснованному выбору и применению на основе понимания описанных механизмов является необходимым условием для повышения технологической надежности, снижения брака и обеспечения воспроизводимого высокого качества при шлифовании ответственных деталей из жаропрочных сплавов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Smith, E.D. An investigation of additively manufactured coolant nozzles for cylindrical grinding applications and progression to high stock removal / E.D. Smith, D. Curtis // 9th CIRP Conference on High Performance Cutting. – 2021. – Vol. 3. – Pp. 162–165. – DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.152.
2. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применения при обработке резанием: справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев [и др.] / Под общ. ред. Л.В. Худобина. – Москва: Машиностроение, 2006. – 544 с.
3. Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools / T. Tawakoli, E. Westkämper, M. Rabiey, A. Rasifard // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47. – Iss. 5. – Pp. 734–739. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.010.
4. Киселев, Е.С. Научные основы и технология применения смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 57 с.

МАКЕТ ПОРТАТИВНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СВОБОДНОЙ ВОДЫ В АВИАЦИОННОМ ТОПЛИВЕ

Елхимов Д.А.¹, магистрант, Свистун М.И.², с.н.с., к.ф.-м.н.,
Заякин О.А.², инженер, к.т.н., Любошенко В.А.¹, магистрант,
Котова С.П.², в.н.с., зав. лабораторией, зам. директора по науке, к.ф.-м.н.

¹ Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Сарове, г. Саров, Российская Федерация

² Самарский филиал ФИАН, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: elhimovda@my.msu.ru

Представлен макет портативного оптического датчика для обнаружения свободной воды в авиационном топливе, созданный на основе метода модулированного лазерного зондирования и синхронного детектирования для обеспечения высокой чувствительности. Линейная зависимость сигнала от концентрации светорассеивающих центров экспериментально продемонстрирована с использованием модельной среды из полистироловых микросфер в дистиллированной воде.

Ключевые слова: свободная вода, рассеяние света на микросферах, оптический датчик воды в керосине, синхронное детектирование

MODEL OF A PORTABLE MEASUREMENT DEVICE FOR FREE WATER CONCENTRATION IN AVIATION FUEL

Elkhimov D.A.¹, Master's Degree student,
Svistun M.I.², senior researcher, PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Zayakin O.A.², engineer, PhD in Technical Sciences, Lyuboshenko V.A.¹, Master's Degree student,
Kotova S.P.², lead researcher, PhD in Physical and Mathematical Sciences

¹ Sarov Branch of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Sarov, Russian Federation

² Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute, Samara, Russian Federation

E-mail: elhimovda@my.msu.ru

This paper presents a model of a portable optical sensor for detecting free water in aviation fuel, based on the method of modulated laser sensing and synchronous detection to ensure high sensitivity. The linear dependence of the signal on the concentration of light scattering centers has been experimentally demonstrated using a model medium of polystyrene microspheres in distilled water.

Keywords: free water, light scattering on microspheres, optical sensor of water in kerosine, synchronous detection

Присутствие свободной воды в авиационном топливе в процессе заправки воздушного судна является серьезной проблемой, так как образованные в условиях полета при низких температурах ледяные кристаллы могут привести к выводу из строя топливных систем и их коррозии. Существующие методы контроля с применением химического анализа или ИК-спектрофотометрии [1] непригодны для оперативного обнаружения взвешенных капель, возникающих при перекачке топлива из-за конденсата и турбулентности. Согласно требованиям ГОСТ 2477-2014, концентрация воды не должна превышать 25 ppm [2]. Наиболее эффективным принципом для такого детектирования является оптическое светорассеяние. Известным промышленным решением является стационарный датчик FAUDI Aviation AFGUARD® [3], что актуализирует задачу разработки компактного отечественного аналога.

Работа продолжает серию экспериментов по светорассеянию в дисперсных средах, проведенных в Самарском филиале ФИАН [4, 5]. К настоящему времени проведена серия экспериментов по изучению явления рассеяния света на микросферах в различных средах (растительном масле с каплями воды и микросферами полистирола, керосине с каплями воды, вода с полистироловыми микросферами) [4, 5]. В данной работе представлено описание элек-

трической схемы макета портативного оптического измерителя концентрации, основанного на методе модулированного зондирования и синхронного детектирования для достижения высокой чувствительности в полевых условиях.

Схема работы измерителя

Рассматриваемое устройство предназначено для измерения концентрации мелкодисперсных нерастворимых примесей в жидкости. Принцип работы устройства основан на эффекте рассеяния лазерного излучения центрами рассеяния в жидкости. Работу устройства поясняет его блок-схема, представленная на рис. 1.

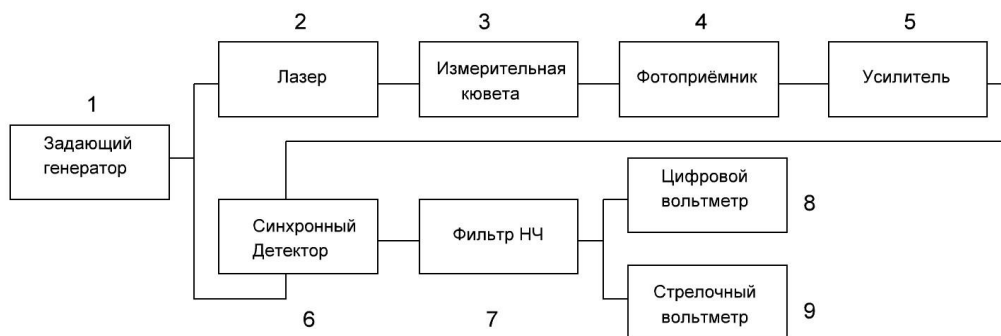


Рис. 1. Блок-схема оптического устройства измерения концентрации

Модулированный по амплитуде зондирующий луч лазера (2) направляется в измерительную кювету (3) с тестируемой жидкостью. Рассеянное лазерное излучение попадает на фотоприемник (4). Далее фотосигнал усиливается (5), синхронно детектируется (6) и после удаления высокочастотного шума фильтром низких частот (7) поступает на цифровой (8) и стрелочный (9) вольтметры. Выходной сигнал вольтметра в первом приближении пропорционален концентрации центров рассеяния в жидкости. Работу отдельных блоков устройства поясняют их принципиальные электрические схемы.

Модуль формирования лазерных импульсов

В устройстве использован лазер с длиной волны излучения 650 нм, максимальной паспортной мощностью излучения 5 мВт и током в импульсе не более 50 миллиампер. Лазер работает в импульсном режиме с частотой следования импульсов в перестраиваемом диапазоне от 300 Гц до 3 кГц. В экспериментах измерения проводились на частоте 300 Гц. На рис. 2 приведена схема задающего генератора импульсов (1) с полупроводниковым лазером (2).

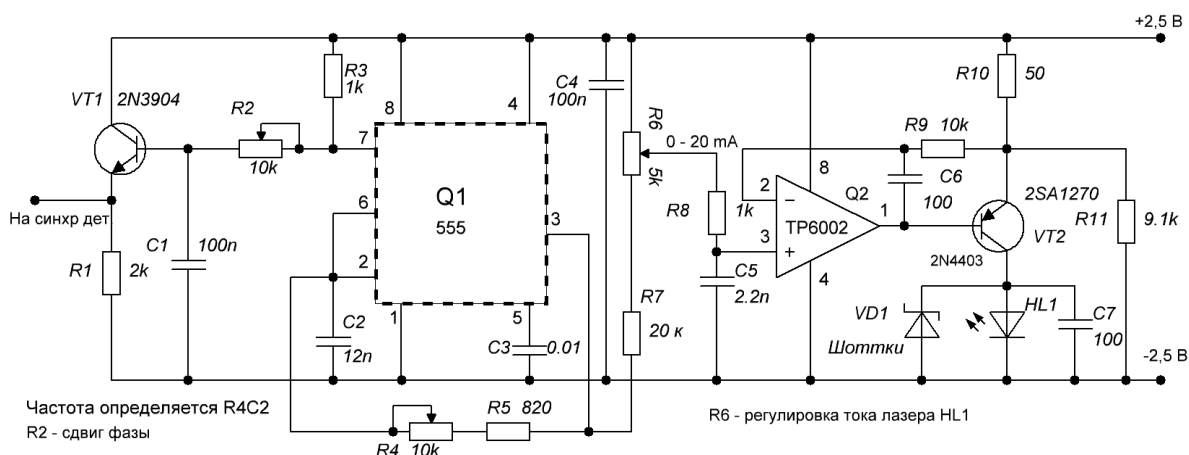


Рис. 2. Принципиальная схема задающего генератора (1) с лазерным диодом (2)

Генератор прямоугольных импульсов в форме меандра (скважность импульсов равна 1) выполнен на микросхеме 555. Частота следования импульсов задается постоянной времени цепочки C2–R4 и равна 400 Гц. Резистор R2 необходим для подстройки работы синхронного

детектора. Он корректирует задержку по фазе фотосигнала, которая в совокупности определяется излучателем, фотоприемником и усилителем.

Драйвер лазера выполнен на операционном усилителе OP6002 и ррр-транзисторе 2SA1270. Ток через лазерный диод HL1 равен отношению разности напряжений (U_8 и U_3 , где U_3 – напряжение на неинвертирующем входе OP6002, U_8 – напряжение питания) к величине сопротивления R_{10} . Резистором R_6 можно изменять напряжение U_3 и, следовательно, ток лазера. При указанных на схеме значениях резисторов ток изменяется в пределах 0–20 мА. Конденсаторы C_5 – C_7 нужны для стабильности работы схемы. Диод Шоттки VD1 должен защитить лазер при неправильной полярности подключения. Важным достоинством схемы является то, что ток через лазер ни при каких обстоятельствах не превысит выбранный максимальный ток (задается величиной R_{10}).

Фотодиодный приемник с усилителем

Фотоприемник (4) выполнен на основе фотодиода ФД-20КП. Площадь чувствительной части фотодиода достаточно большая – 4 мм², что позволяет легко получить высокую чувствительность прибора. Схема фотоприемника представлена на рис. 3, а.

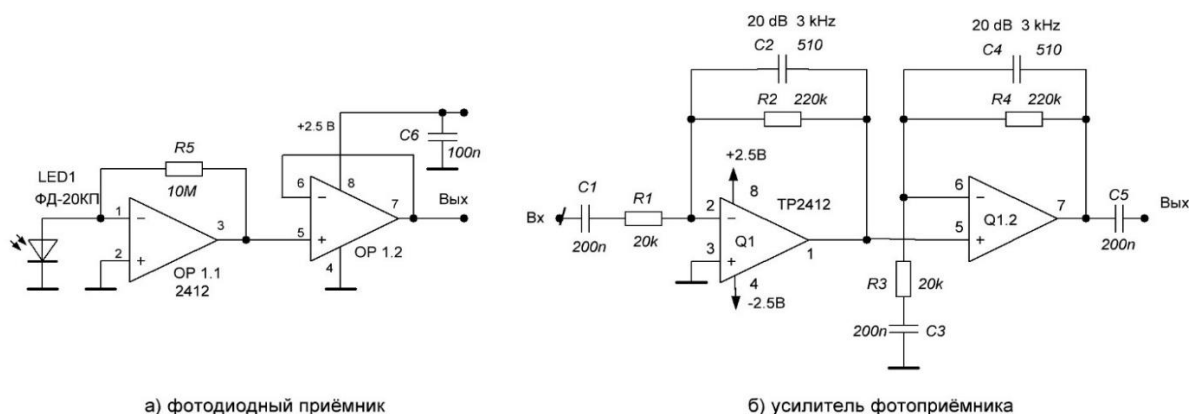


Рис. 3. Принципиальная схема фотодиодного приемника (4) и усилителя фотоприемника (5)

В фотоприемнике использована простая, но очень эффективная схема с фотодиодом (ФД) и операционным усилителем (ОУ), с которым фотодиод работает в фотовольтаическом режиме без обратного смещения (в этом режиме на фотодиод подается запирающее напряжение). Чувствительность фотодиода равна 4,4 мА/лм [6], темновой ток – не более 0,05 мкА, постоянная времени – не более 1 мкс.

Фототок диода поступает непосредственно на инвертирующий вход операционного усилителя. При этом выходное напряжение ОУ равно произведению фототока диода на величину сопротивления резистора R_1 . Операционный усилитель должен иметь малый шум, малый входной ток и малое напряжение смещения. Этим требованиям вполне удовлетворяет микросхема ОУ TP2412. Это малошумящий двухканальный операционный усилитель, способный работать при низком напряжении питания (2,2–5,5 В). Нагрузочное сопротивление R_1 , которое определяет чувствительность приемника, достаточно велико – 10 МОм. При этом схема обладает достаточно высоким для представленного прибора быстродействием. Первый канал ОУ (OP1.1) – это собственно фотоприемник, второй канал (OP1.2) – это повторитель, обеспечивающий низкое выходное сопротивление приемника.

Фотоприемник выполнен в виде малогабаритного выносного датчика, подключаемого к основному блоку устройства экранированным кабелем. Питается датчик от стабилизированного напряжения 2,5 В, подающегося по кабелю.

Напряжение фотосигнала с датчика подается по кабелю на усилитель (5), в котором оно усиливается до достаточного для детектирования уровня. Схема блока показана на рис. 3, б.

Усилитель собран на микросхеме TP2412, включающей в себя два малошумящих операционных усилителя. Соответственно, усилитель имеет два каскада усиления переменного

напряжения, каждый каскад по 20 дБ (усиление по напряжению в 10 раз). Для нормальной работы следующего каскада, детектора, максимальная амплитуда переменного напряжения на выходе усилителя не должна превышать 1 В. Полоса пропускания усилителя искусственно сужена для уменьшения уровня шумов. Определяется полоса цепочками R1–C1 и R2–C2 для первого каскада и R3–C3, R4–C4 для второго и составляет 300–3000 Гц. При этом частота полезного сигнала равна 400 Гц. Питается усилитель от стабилизированного двухполярного источника $\pm 2,5$ В.

Синхронный детектор

Для точного определения амплитуды сигнала с малым уровнем, когда требуется высокая линейность детекторной характеристики, лучшим выбором является синхронный детектор. Синхронный детектор способен извлекать слабые сигналы, которые могут быть ниже уровня шума. Синхронное детектирование основано на операции умножения сигналов. После перемножения полезного сигнала с опорным и прохождения через фильтр на выходе детектора выделяется полезный сигнал и гасится сигнал помехи. Синхронный детектор действует как полосовой фильтр, который настроен на частоту опорного сигнала и имеет полосу пропускания, равную частоте среза фильтра нижних частот. Схема синхронного детектора показана на рис. 4.

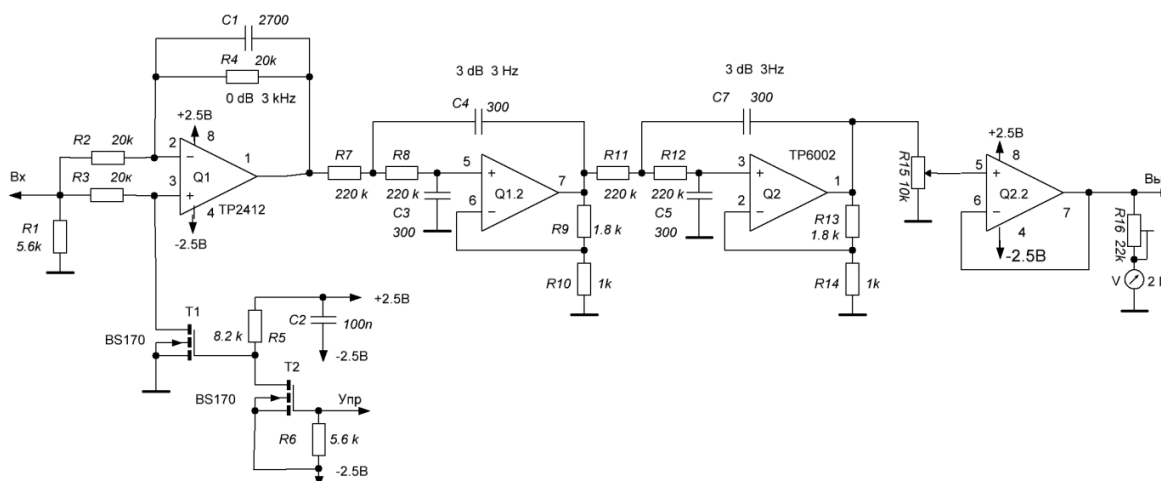


Рис. 4. Принципиальная схема синхронного детектирования (6) и фильтра низких частот (7)

Основным элементом синхронного детектора является перемножитель, собранный на операционном усилителе Q1 и электронном ключе на транзисторе T1. Под действием управляющего сигнала ключ замыкает (или размыкает) неинвертирующий вход Q1 на землю. При замкнутом ключе ОУ работает по схеме инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления $K = -1$, а при разомкнутом ключе – по схеме неинвертирующего усилителя с $K = 1$. Ключ управляется выходным сигналом с задающего генератора (см. рис. 2). Управляющий сигнал подается на затвор управляющего транзистора T2. С выхода перемножителя сигнал поступает на фильтр низкой частоты, собранный на двух операционных усилителях Q1.2 и Q2, каждый из которых имеет затухание 40 дБ/дек. После повторителя на ОУ Q2.2 отфильтрованный полезный сигнал поступает на вольтметр. Частота среза фильтра НЧ – 3 Гц.

При построении схемы применяются малощумящие операционные усилители TP2412 (Q1) и TP6002 (Q2) с низким напряжением питания. В качестве электронного ключа использован полевой транзистор BS170. Сопротивление канала открытого транзистора BS170 – не более 5 Ом, пороговое напряжение затвора равно 2,1 В. Это достаточно низкое напряжение, что хорошо для низковольтного (5В) питания. Максимальное выходное напряжение в линейной области равно 2000 мВ.

Источник питания. Устройство питается от двух Li-ion аккумуляторов типа 18650, напряжение с которых стабилизируется двумя микросхемами SSP6202P252 на уровне 2,5 В.

Микросхемы образуют двухполярный источник стабилизированного напряжения $\pm 2,5$ В со средней точкой, подключенной к общей земле устройства. Прибор потребляет не более 30 мА, что позволяет работать не менее 100 ч до разряда аккумуляторов с заданной емкостью.

Результаты. Для калибровки макета были проведены измерения на модельной среде – дистиллированной воде с полистироловыми микросферами с известным диаметром 1 мкм. Ниже на рис. 5 представлена зависимость сигнала рассеяния на оптических центрах от концентрации микросфер в дистиллированной воде. Монотонная зависимость сигнала от угла детектирования находится в области от 7 до 15 градусов [4, 5]. Угол детектирования рассеяния выбран произвольно и составил 10 градусов. Учтен общий фоновый сигнал от электронного шума и отражений от стенок кюветы.

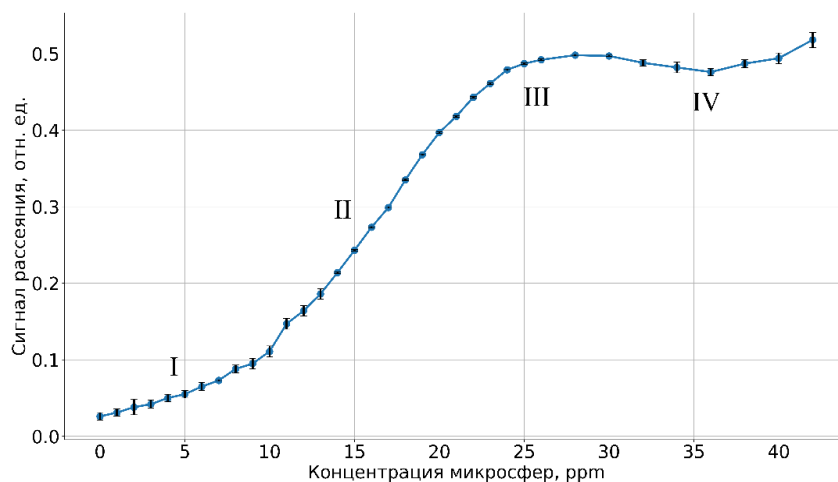


Рис. 5. Сигнал рассеяния от концентрации микросфер размером 1 мкм в дистиллированной воде

На кривой наблюдаются четыре характерных участка: 1) область медленно возрастающего линейного отклика (I) до 10 ppm; 2) область линейного отклика (II) 10–25 ppm, где сигнал пропорционален концентрации; 3) область насыщения (III) 25–30 ppm, связанная с эффектами многократного рассеяния; 4) спад сигнала (IV) от 30 ppm, предположительно, объясняемый ослаблением зондирующего пучка многократным рассеянием в высококонцентрированной среде. Для количественных измерений предназначены участки I и II. Измеренная в эксперименте чувствительность датчика составила 0,33 мкВт/В, предельная чувствительность 300 пВт. Полученная калибровочная зависимость для модельных микросфер является основой для последующей калибровки прибора на реальных средах «вода – керосин». Учитывая, что нормируемое содержание свободной воды в авиационных топливах не должно превышать 25 ppm [2], что соответствует левой части построенной кривой, можно утверждать, что разработанный макет обладает достаточной чувствительностью для решения поставленной задачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рябов, В.Д. Химия нефти и газа: учебное пособие / В.Д. Рябов. – Москва: ИД «ФОРУМ», 2009. – 336 с.
2. ГОСТ 2477-2014. Межгосударственный стандарт. Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды. – Москва: Издательство стандартов, 2000.
3. FAUDI Aviation GmbH – Operating Instructions for Sensor for the measurement of free water in Jet Fuel [Электронный ресурс]. – Version 2.3. – 2023 (дата обращения: 20.01.2026).
4. Исследование рассеяния света на эмульсии воды в масле с целью контроля содержания воды в несмешивающейся жидкости / А.И. Пономарев, О.А. Заякин, С.П. Котова [и др.] // Изв. РАН. Сер. Физика. – 2022. – Т. 86, № 12. – С. 1690.
5. Исследование рассеяния света в модельных средах для разработки датчика воды в авиационном топливе / В.А. Любошенко, Д.А. Елхимов, С.П. Котова [и др.] // Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55, № 4. – С. 249.
6. Аксененко, М.Д. Приемники оптического излучения: справочник / М.Д. Аксененко, М.Л. Баранчиков. – Москва: Радио и связь, 1987. – 296 с.

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ

Захаров О.В. , профессор, д.т.н., профессор, **Пимушкин Я.И.**, к.т.н., доцент,
Сулейманова Ф.Д., студент

*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: o.zakharov@stankin.ru*

Одним из современных трендов в метрологии поверхности стало применение координатно-измерительных машин для оценки шероховатости. Однако метрологические возможности координатно-измерительных машин отличаются от традиционно используемых для этой задачи профилометров. В статье представлен сравнительный анализ технических характеристик, показывающий эффективную область применения отечественных координатно-измерительных машин.

Ключевые слова: метрология поверхности, измерение, шероховатость, координатно-измерительная машина, диапазон измерения

ASSESSMENT OF THE METROLOGICAL CAPABILITIES OF A DOMESTIC COORDINATE MEASURING MACHINE FOR ROUGHNESS MEASUREMENT

Zakharov O.V. , Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor,
Pimushkin Ya.I., PhD in Engineering sciences, Associate Professor, **Suleymanova F.D.**, student

*Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russian Federation
E-mail: o.zakharov@stankin.ru*

One of the modern trends in surface metrology has become the use of coordinate measuring machines for roughness assessment. However, the metrological capabilities of coordinate measuring machines differ from the roughness tester traditionally used for this task. The article presents a comparative analysis of technical characteristics, showing the effective field of application of domestic coordinate measuring machines.

Keywords: surface metrology, measurement, roughness, coordinate measuring machine, measuring range

В метрологии поверхности в последнее время появились новые тренды, такие как расширение сферы применения бесконтактных методов, контроль макрообъектов с микроточностью, совмещение нескольких типов измерений в одном приборе [1–5]. Одним из современных направлений стало измерение шероховатости с помощью координатно-измерительных машин (КИМ). Преимущества такого подхода очевидны – измерение всех геометрических характеристик изделия на одном рабочем месте. Однако по сравнению с традиционным измерением на профилометрах имеются ограничения, которые сужают область эффективного применения. Ведущие мировые компании Zeiss (Германия) и Mitutoyo (Япония) предложили свои решения в этом направлении. Наиболее простым решением стало применение стандартных датчиков для профилометров и их адаптация к применяемым на КИМ измерительным головкам. Компания Mitutoyo предложила использовать известный датчик SurfTest на новой измерительной головке Surface Roughness Probe Systems. Компания Zeiss вначале использовала датчики компании Mahr (Германия), а затем разработала новый датчик и измерительную головку с двумя поворотными осями ZEISS ROTOS. Измерительная головка Surface Probe Systems имеет следующие метрологические характеристики [6]: радиус шупа 2,

5, 10 мкм; усилие на шупе 4 мН; скорость сканирования 0,25–0,75 мм/с. Измерительная головка ZEISS ROTOS имеет следующие метрологические характеристики [7]: разрешение по оси Z 0,005 мкм, по оси X 0,5 мкм; усилие при скольжении 200 мН, при касании шупа 5 мН; скорость перемещения 0,05–0,5 мм/с; точность по параметру Ra $\pm 5\% + 30$ нм.

Основным преимуществом решений, представленных компаниями Zeiss и Mitutoyo, является опора на хорошо отработанные конструкции шупов и датчиков для измерения шероховатости. Недостаток заключается в возможности измерения шероховатости только по прямолинейным траекториям перемещения датчика. Измерительная головка выводит датчик в заданное положение и придает нужную ориентацию, а датчик перемещается только прямолинейно. При этом становится возможным измерение шероховатости на нескольких простых поверхностях на детали без ее перемещения. Вместе с тем измерение шероховатости на криволинейных поверхностях остается нерешенной задачей. Отечественные координатно-измерительные машины представлены компаниями Лапик (Саратов) и НИИИЗмерения (Москва). Наиболее точными моделями являются КИМ-100П (Лапик) и БВ-2030 (НИИ-Измерения). При этом КИМ-1000 производится серийно, в то время как БВ-2030 – под заказ. Модельный ряд КИМ был разработан совместно с МГТУ «СТАНКИН» [8]. КИМ-100П имеет следующие метрологические характеристики [9]: дискретность отсчета линейных перемещений 0,079 мкм; погрешность измерения формы $(1,2 + L/250)$ мкм (L – длина перемещения в мм); минимальный радиус шупового наконечника 0,025 мм, полное шестимерное сканирование (с прецизионным наклоном шупа). БВ-2030 имеет следующие метрологические характеристики: шаг дискретности измерения координатных перемещений 0,01 мкм; основная погрешность измерения длины вдоль координатных осей $(0,25 + L/1000)$ мкм; основная погрешность измерительной головки (2σ) 0,2 мкм.

КИМ в подавляющем большинстве случаев используют измерительные головки компании Renishaw [10]. Наиболее часто применяются головка PH10 PLUS с повторяемостью позиции 0,4 мкм. С этой головкой можно использовать датчики для поточечного и сканирующего измерения. Контактный датчик TP200 имеет следующие технические характеристики: однонаправленная повторяемость (2σ) 0,4 мкм; усилие срабатывания на кончике шупа 0,02Н; диаметр шупа 3–10 мм, сферичность 0,13 мкм. Сканирующий датчик SP25M имеет следующие технические характеристики: диаметр 3–8 мм; неопределенность измерения 0,48 мкм.

Основные отличия координатного измерения от традиционного измерения шероховатости: контактное усилие шупа – профилометр имеет 0,75–4 мН, КИМ имеет от 7 до 20 мН; радиус шупа – профилометр имеет 2, 5, 10 мкм, КИМ имеет минимальное значение 25 мкм; дискретность по вертикальной оси (высота профиля) – профилометр имеет от 0,8 нм (лабораторный) до 0,01 мкм (промышленный), КИМ имеет от 0,01 до 0,1 мкм; диапазон измерения головки – профилометр имеет от 0,25 мм до 8 мм (в соответствии со стандартной базовой длиной), КИМ имеет в пределах от 100 мм до 1200 мм; диапазон измерения шупа – профилометр имеет до 0,1 мм для промышленных профилометров и до 10 мм у контурографа Marh, КИМ имеет $\pm 0,5$ мм во всех направлениях; дискретность по горизонтальной оси (вдоль профиля) – профилометр имеет $\pm(0,2 + L/1000)$ мкм, КИМ имеет от $(1,2 + L/250)$ до $(0,25 + L/1000)$ мкм; основная относительная допускаемая погрешность по параметру Ra – только для профилометров от $2\% \pm 2$ нм (лабораторный) до $\pm 5\% + 30$ нм (промышленный); скорость сканирования – профилометр имеет до 0,75 мм/с, КИМ имеет до 125 мм/с.

Анализ показывает, что наиболее критичными характеристиками являются контактное усилие шупа, радиус шупа и дискретность датчика по вертикальной и горизонтальной осям. У профилометра контактное усилие шупа в 5–10 раз меньше, чем у КИМ. Причем у КИМ приведенные значения усилия справедливы для поточечного съема данных, при скольжении в режиме сканирования контактное усилие кратно возрастает. Достигнутые результаты по минимальному радиусу шупа у КИМ также в 5–10 раз больше, чем у профилометров. Это обусловлено тем, что шуп профилометра представляет собой алмазную пирамиду или конус. Шуп КИМ имеет рабочую часть в виде рубиновой или алмазной сферы. Причем необходима калибровка шупа для точного определения радиуса сферы. Эти данные используются для

алгоритма компенсации радиуса щупа. Наилучшая дискретность по вертикальной оси у КИМ соответствует варианту промышленного профилометра. Лабораторный вариант профилометра имеет дискретность примерно в 10 раз меньше. Дискретность по горизонтальной оси у профилометра и КИМ примерно одинаковая. Основная трудность состоит в том, что с уменьшением радиуса щупа требуется уменьшать контактное усилие. Эксперименты показали, что при радиусе щупа менее 0,1 мм применение стандартного сканирующего щупа приводит к заклиниванию.

Другой проблемой при измерении шероховатости является обработка данных измерения, которая существенно отличается для профилометров и КИМ. Первым этапом обработки данных профилометров является фильтрация, которая из первичного профиля выделяет профиль шероховатости [11]. Для этой цели стандартно используют открытый фильтр Гаусса. При измерении на КИМ первым этапом обработки данных традиционно будет компенсация радиуса щупа. Вторым этапом является выравнивание систем координат. При уменьшении радиуса щупа задача компенсации его радиуса существенно усложняется, хотя при этом относительная ошибка уменьшается. Применение стандартного фильтра Гаусса также вызывает затруднение, связанное с неравномерностью получаемых координат по горизонтальной оси. Это объясняется методикой компенсации радиуса щупа. Одним из возможных решений будет применение морфологического фильтра [12]. При кусочно-линейной интерполяции неравномерность дискретности отсчета может быть минимизирована.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01322, <https://rscf.ru/project/25-29-01322/>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кононогов, С.А. Координатная метрология / С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко. – Москва: АСМС, 2010. – 380 с.
2. Whitehouse, D.J. Handbook of Surface and Nanometrology / D.J. Whitehouse. – 2nd ed. – London: CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton FL, 2011. – 999 p.
3. Development of a Software and Hardware Complex for Monitoring Processes in Production Systems / V. Pechenin, R. Paringer, N. Ruzanov, A. Khaimovich // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – Iss. 5. – 1527.
4. Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы / К.В. Епифанцев, Г.А. Петров, В.Н. Белопухов, О.А. Заякин // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 1. – С. 63–76.
5. Осипов, К.Н. К вопросу минимизации количества многократных измерений / К.Н. Осипов, А.И. Балакин // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – 2025. – № 1 (29). – С. 111–117.
6. Surface Roughness Probe Systems [Электронный ресурс]. – URL: https://pim.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/2120_Surftest_Probe.pdf (дата обращения: 29.01.2026).
7. ZEISS ROTOS [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/cmms/probes-sensors/zeiss-rotos.html> (дата обращения: 29.01.2026).
8. Разработка модельного ряда координатно-измерительных машин / Д.А. Мастеренко, П.Н. Емельянов, М.Г. Ковальский [и др.] // Измерительная техника. – 2013. – № 12. – С. 23–27.
9. Координатно-измерительные машины Лапик [Электронный ресурс]. – URL: <https://lapic.ru/produkcziya/koordinatno-izmeritelnaya-mashina-kim-1000p/> (дата обращения: 29.01.2026).
10. CMM Renishaw [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.renishaw.com/en/cmm-hardware> (дата обращения: 29.01.2026).
11. Захаров, О.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Часть 1. Обзор профильных фильтров / О.В. Захаров, А.С. Яковичин, А.В. Жуков // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2022. – № 2 (93). – С. 22–37.
12. Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции для дискового морфологического фильтра / О.В. Захаров, А.Г. Лаптев, В.Г. Лысенко [и др.] // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 35–40.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ХЛОПКООЧИСТИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Керимов У.Г., к.т.н., и.о. доцента

Азербайджанский технологический университет, г. Гянджа, Республика Азербайджан
E-mail: kerimov_husnu@mail.ru

Функциональной является такая форма взаимозаменяемости, при которой обеспечивается не только возможность бесподгоночной сборки или замены при ремонте узлов и деталей, но и оптимальные эксплуатационные показатели работы машины: качество продукции, производительность, расход энергии, долговечность, износоустойчивость, коэффициент полезного действия и т. д. Функциональная взаимозаменяемость – принцип проектирования, производства и эксплуатации, при котором требования к точности ответственных деталей и сборочных единиц назначаются исходя из установления взаимосвязи показателей качества изделия с функциональными параметрами. Показано, что предметом исследования является эксплуатационная часть посадки, поэтому при конструировании хлопкоочистительных машин имеет принцип функциональной взаимозаменяемости по входным и выходным технологическим показателям хлопка-сырца и его продукции, геометрическим, механическим и кинематическим параметрам.

Ключевые слова: хлопкоочистительная машина, проектирование, функциональная взаимозаменяемость, точность, параметры

FUNCTIONAL INTERCHANGEABILITY AND ITS APPLICATION IN THE DESIGN OF COTTON GINS

Kerimov H.Q., PhD in Technical Sciences, Acting Associate Professor

Azerbaijan Technology University, Ganja, Republic of Azerbaijan
E-mail: kerimov_husnu@mail.ru

Functional is a form of interchangeability that provides not only the possibility of non-adjustable assembly or replacement during repair of components and parts, but also optimal performance indicators of the machine: product quality, productivity, energy consumption, durability, wear resistance, efficiency, etc. Functional interchangeability is a principle of design, production and operation, in which requirements for the accuracy of critical parts and assembly units are assigned based on establishing the relationship between product quality indicators and functional parameters. It is shown that, the subject of the study is the operational part of the landing, therefore in the design of cotton gin, the principle of functional interchangeability according to the input and output technological indicators of raw cotton and its products, as well as geometric, mechanical and kinematic parameters, is of significant importance.

Keywords: cotton gin, design, functional interchangeability, accuracy, parameters

Работами А.И. Якушева, Б.С. Балакшина, И.В. Дунин-Барковского и многих других ученых внесен серьезный вклад в разработку закономерностей функциональной взаимозаменяемости во многих отраслях машиностроения, в том числе при выпуске машин по хлопкоочистке. К настоящему времени определилась методика исследований функциональной взаимозаменяемости [1].

1. Определяются эксплуатационные показатели машины, прибора или их рабочих узлов и выявляются параметры, влияющие на них, которые и называются функциональными. Функциональные параметры в зависимости от действия машины могут быть технологическими, геометрическими, механическими, кинематическими, пневматическими, электрическими и др.

2. Устанавливается форма связи функциональных параметров с эксплуатационными показателями, которая может быть функциональной, корреляционной или случайной. Определяется степень влияния параметров на эксплуатационные показатели машины или ее рабочего узла. Связь эта может быть определена аналитически или экспериментально.

3. Устанавливаются допустимые отклонения эксплуатационных показателей машины, исходя из которых определяются оптимальные допуски на связанные с ними функциональные параметры.

Наибольшее значение при конструировании хлопкоочистительных машин имеет принцип функциональной взаимозаменяемости по входным и выходным технологическим показателям хлопка-сырца и его продукции, геометрическим, механическим и кинематическим параметрам.

Геометрические параметры. В метрологии предложена единая классификация погрешностей геометрических параметров. В подвижных соединениях погрешности геометрических параметров вызывают динамические и контактные перегрузки, нарушают характер трения и ход технологического процесса, а в неподвижных соединениях нарушают их прочность. В ходе эксплуатации подвижные посадки, технологические разводки и зазоры изменяют свое первоначальное значение; это оказывает влияние на эксплуатационные показатели работы машины. Начальный период работы подвижных сопряжений характеризуется интенсивным износом работающих поверхностей, а получившаяся при этом шероховатость длительно сохраняется. Она получила название оптимальной (так как имеет оптимальную высоту, форму и угол наклона).

Опытами Махкамова Р.Г. [2] установлено, что процесс приработки пильного цилиндра длится 8–16 час., в течение которых происходит снижение пороков дженирования на 0,3–0,4 %. Из работы Болдинского Г.И. следует, что процесс приработки пил сопровождается уменьшением удельного расхода энергии на тонну выработанного волокна и снижением пороков дженирования [5]. При этом выявлено влияние периода приработки пил на качество процесса дженирования, но не определена оптимальная размерная характеристика шероховатости [4, 6]. Работами ЦНИИХПррома выбран оптимальный зазор между воздухосъемным аппаратом джина и пильным цилиндром в 1,5–2 мм. Нормируемые допуски на диаметр пильного диска и его эксцентricность связаны с оптимальным зазором так же, как и допускаемая погрешность сборки. Последняя может совершенно исказить характер технологической установки пильного цилиндра и воздухосъемного аппарата.

В работах Джамаловой М.М., Рыбальской М.Б., Банникова Г.В., Харцман Д.Е., Захарова И.Я., Кушнарченко Г.Д. и многих других описывается разработка функциональных параметров отдельных хлопковых машин, что способствовало проектированию новых конструкций машин. Однако не всегда выявлялись допуски на функциональные параметры и их влияние на работу хлопковой машины в эксплуатационный период.

Качество продукции и другие показатели хлопковой машины во многом зависят от функциональных зазоров и разводов, которые можно считать технологическими посадками. Исходя из требований функциональной взаимозаменяемости допуск функционального размера должен делиться на две части: конструктивную (для нормирования погрешности изготовления и сборки) и эксплуатационную (для сохранения оптимального режима работы посадки). Эксплуатационная часть посадки и должна быть предметом исследования [7, 8].

Технологические параметры. На выходные параметры продукции хлопковой машины при неизменном положении функциональных параметров оказывают влияние входные параметры продукта, поступающего в машину для переработки. Обеспечение оптимальных показателей выходной продукции может быть достигнуто регулировкой (в том числе и автоматической) эксплуатационных допусков функциональных параметров. Установление связей входных и выходных параметров продукта переработки с функциональными параметрами представляет большой интерес для исследования.

Механические параметры. Большое значение для эксплуатационных показателей машины имеют механические свойства ответственных деталей ее рабочих органов: твер-

дость, наклеп, направление и величины остаточных напряжений, упругие свойства и т. д. Выявление оптимальных значений этих свойств для эксплуатационных показателей и установление допусков на них является важным для принципа функциональной взаимозаменяемости и повышения надежности работы хлопковой машины.

Кинематические параметры. Известно, что режимы обработки и воздействия оказывают большое влияние на качественные показатели продукции хлопкозавода. На режимы обработки, в свою очередь, влияют входные параметры обрабатываемого продукта. Следует выявить оптимальные режимы дженирования, линтерования и очистки хлопка-сырца и его отходов от сорных примесей и определить допуски на них, обеспечивающие оптимальную работу машины.

Не менее интересно проведение исследований энергетических, пневматических и других функциональных параметров хлопковых машин. Выявление наибольшего количества важных функциональных параметров создаст научные основы конструирования хлопковых машин и обеспечит программированное управление технологическим процессом хлопковой машины и хлопкозавода в целом [3]. В заключение можно утверждать, что первоочередной задачей в конструкторско-эксплуатационном направлении хлопкового машиностроения являются:

- исследование и разработка руководящих указаний по расчету допусков и посадок на основные детали и сопряжения хлопковых машин и приборов;

- исследование влияния отклонений формы, шероховатости и взаимного положения поверхностей рабочих деталей и их физико-механических свойств на эксплуатационные показатели хлопковых машин и приборов; разработка метода определения оптимального качества рабочей поверхности;

- разработка методов расчета допусков размерных цепей функциональных параметров хлопковых машин и приборов с учетом их изменений в период эксплуатации и в заданный срок надежности;

- исследование влияния на функциональные параметры введения в конструкцию машины новых материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Марков, Н.Н. Нормирование точности в машиностроении / Н.Н. Марков. – Москва: Станкин, 1992. – 320 с.
2. Влияние геометрических параметров зубьев джиновых пил на производительность джина и качества вырабатываемой хлопковой продукции / Р.Г. Махкамов, Д.У. Мадрахимов, Р.Р. Назиров, Т.Н. Корабельникова // Проблемы текстиля. – Ташкент, 2017. – № 2. – С. 9–15.
3. Хамов, М.Г. Ремонт, монтаж и наладка хлопкоочистительного оборудования / М.Г. Хамов. – Ташкент: Укитувчи, 2010. – 536 с.
4. Основы проектирования текстильных машин / О.П. Андреев, К.М. Гладков [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1976. – 230 с.
5. Болдинский, Г.И. О трении волокна о зубья пилы / Г.И. Болдинский // Хлопковая промышленность. – 1972. – № 2. – С. 15–18.
6. Керимов, У.Г. Совершенствование очистителя хлопка-сырца от мелкого сора / У.Г. Керимов // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2018): сборник материалов Международной научно технической конференции, 14–15 ноября 2018 г. – Москва: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2018. – С. 37–39.
7. Велиев, Ф.А. Проектирование отраслевых машин / Ф.А. Велиев. – Баку: АГЭУ, 2016. – 316 с.
8. Иброгимов, Х.И. Моделирование процесса очистки хлопка-сырца / Х.И. Иброгимов, Р.В. Корабельников, Ф.М. Сафаров // Материалы Республиканской научно-практической конференции, посвященной 35-летию кафедры Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты, ТТУ. – Душанбе: Таджикский технический университет, 2009. – С. 150–155.

РАСЧЕТ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ДЛЯ ПРОТЯЖКИ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ И ПРОТЯЖКИ СО СМЕННЫМИ ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

Копьяк Д.Г., аспирант

Самарский государственный технический университет,
Самара, Российская Федерация
E-mail: kopyakdg@gmail.com

Представлены результаты разработки и сравнительного анализа сборной твердосплавной протяжки для обработки пазов в титановом сплаве VT20. Проведен расчет режимов резания и силовых параметров, показавший, что новая конструкция с шахматным расположением зубьев позволяет увеличить скорость резания по сравнению с цельным быстрорежущим инструментом. Это обеспечивает сокращение основного времени обработки и повышает экономическую эффективность за счет многократного использования корпуса и сменных пластин. Работа подтверждает перспективность применения сборного инструмента для повышения производительности в машиностроении.

Ключевые слова: протягивание, пазы, протяжка, твердосплавные пластины, механическое крепление, труднообрабатываемые материалы

CALCULATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF CUTTING MODES FOR HIGH-SPEED STEEL AND INTERCHANGEABLE HARD-ALLOY PLATES

Kopyak D.G., PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: kopyakdg@gmail.com

The article presents the results of the development and comparative analysis of a composite carbide broach for processing grooves in the VT20 titanium alloy. The calculation of cutting modes and force parameters showed that the new design with a staggered arrangement of teeth allows for an increase in cutting speed compared to a solid high-speed tool. This results in a reduction in the main processing time and increases economic efficiency due to the reusable use of the body and replaceable inserts. The work confirms the potential of using composite tools to increase productivity in mechanical engineering.

Keywords: broaching, slots, broach, carbide inserts, mechanical fastening, difficult-to-machine materials

Протягивание является одним из наиболее производительных и точных методов обработки сложных поверхностей, обеспечивающим высокое качество получаемого профиля и стабильность размеров [1]. Особую значимость этот процесс приобретает в высокотехнологичных отраслях, таких как авиа- и двигателестроение, где широко применяются трудные в обработке конструкционные материалы, в частности титановые сплавы.

Сочетание высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и жаропрочности титана VT20 создает значительные сложности для его механической обработки резанием. Низкая теплопроводность сплава приводит к концентрации тепла в зоне резания и на режущей кромке инструмента, вызывая интенсивный абразивный и диффузионный износ. Кроме того, склонность титана к налипанию на инструмент и упрочнению при пластическом деформировании создает предпосылки для вибраций и повышенных силовых нагрузок. Эти факторы

в совокупности резко сокращают стойкость традиционного инструмента, вынуждают применять заниженные режимы резания и, как следствие, снижают общую эффективность операции.

Исторически для обработки пазов в деталях из титановых сплавов применялись цельные протяжки, изготовленные из быстрорежущих сталей (например, P18). Однако данный инструментальный подход имеет ряд существенных ограничений [2]: низкие допустимые скорости резания (1–5 м/мин); высокие удельные затраты на частые переточки; полный выход инструмента из строя после исчерпания ресурса переточек. Это делает процесс малопроизводительным и экономически затратным в условиях серийного производства.

Альтернативой выступает переход на инструмент с механическим креплением сменных режущих пластин из твердого сплава [3]. Данная концепция обладает принципиальными преимуществами: возможность использования износостойких и термостойких материалов пластин (твердые сплавы с многослойными покрытиями, такими как TiAlN); сокращение времени на восстановление работоспособности за счет замены только изношенных элементов; многократное использование корпуса инструмента. Для повышения эффективности протягивания вязких материалов, таких как титан, перспективной является конструкция с шахматным расположением зубьев, которая способствует дроблению стружки и улучшает условия ее отвода, снижая силовое и тепловое воздействие на инструмент.

Таким образом, существует очевидная технико-экономическая проблема, связанная с низкой производительностью и высокими эксплуатационными издержками при использовании цельных быстрорежущих протяжек для обработки титана. Ее решение видится во внедрении инновационного инструмента. Однако обоснование такого перехода требует проведения сравнительного анализа, учитывающего как технологические возможности (режимы резания, силовые нагрузки), так и эксплуатационные характеристики инструментов.

Исследование выполнено на примере операции предварительного протягивания паза в заготовке из титанового сплава BT20. Геометрические параметры паза: ширина $B = 16,2$ мм, длина $L = 40$ мм.

В качестве объекта сравнения выступают два типа инструмента:

1. Цельная протяжка из быстрорежущей стали P18, используемая на предварительной операции. Количество режущих зубьев $z = 36$. Инструмент формирует паз глубиной 1,7 мм. Подъем на зуб $S_z = 0,047$ мм/зуб.

2. Сборная протяжка со сменными многогранными пластинами из твердого сплава с покрытием TiAlN, предлагаемая для замены базового варианта. Корпус выполнен из стали 40X. Количество зубьев $z = 22$. Поскольку твердосплавные пластины имеют больший запас прочности и стойкости, было принято решение увеличить величину снимаемого припуска и выполнить паз глубиной 2,09 мм. Подъем на зуб $S_z = 0,19$ мм/зуб.

Методика сравнительного анализа включает два этапа.

Первый этап – определение режимов резания. Определим режимы резания для протяжки из P18 и протяжки со сменными пластинами по формуле

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot S_z^{xv}}, \quad (1)$$

где C_v , m , xv – справочные коэффициенты;

T – стойкость инструмента.

Второй этап – расчет и сравнение силовых нагрузок. На основе полученных скоростей и геометрических параметров для каждого инструмента рассчитывается сила резания на зуб и общее усилие протягивания с учетом числа одновременно работающих зубьев, рассчитываемого из шага и длины обрабатываемого паза.

Критерием сравнительной оценки является производительность обработки, определяемая через основное технологическое время, при условии обеспечения допустимых силовых нагрузок. Исходные данные для расчета сведены в таблицу.

Исходные данные

Параметр	Цельная протяжка (P18)	Протяжка со сменными пластинами
Обрабатываемый материал	Титан BT-20	Титан BT-20
Глубина паза, h	1,7 мм	2,09 мм
Ширина паза, B	16,2 мм	16,2 мм
Длина паза, L	40 мм	40 мм
Подъем на зуб, S_z	0,047 мм/зуб	0,19 мм/зуб
Шаг зубьев, t	13 мм	42 мм
Число одновременно работающих зубьев, q	3	2

Сила резания определяется по формуле [4]

$$P_z = \frac{60 \times S_z^{0,5} \times \delta^{0,8} \times h^{0,06}}{V^{0,015}}. \quad (2)$$

Скорость резания рассчитывается для протяжки со сменными пластинами:

$$V = \frac{C_v}{T^m \times S_z^{xv}} = \frac{12}{120^{0,43} \times 0,19^{0,61}} = 4,22 \text{ м/мин.}$$

Скорость резания для протяжки из P18:

$$V = \frac{C_v}{T^m \times S_z^{xv}} = \frac{3,6}{60^{0,5} \times 0,047^{0,46}} = 1,9 \text{ м/мин.}$$

Теперь рассчитаем силу резания для протяжки из стали P18:

$$P_z = \frac{60 \times 0,047^{0,5} \times 93^{0,8} \times 0,06^{0,06}}{1,9^{0,015}} = 196 \text{ Н.}$$

Теперь рассчитаем силу резания для протяжки со сменными пластинами:

$$P_z = \frac{60 \times 0,19^{0,5} \times 93^{0,8} \times 0,06^{0,06}}{4,22^{0,015}} = 393 \text{ Н.}$$

Общую силу резания можно рассчитать как

$$P_{z \text{ общ}} = P_z \cdot q. \quad (3)$$

Рассчитаем общее усилие для протяжки из P18 и со сменными пластинами:

$$\begin{aligned} P_{z \text{ общ P18}} &= 196 \cdot 3 = 588 \text{ Н;} \\ P_{z \text{ общ см.пласт}} &= 393 \cdot 2 = 786 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Результаты расчета выявили качественное преимущество сборного инструмента, которое заключается не в экстремальном росте одного параметра, а в синергии нескольких ключевых факторов.

Применение расчетной скорости резания 4,22 м/мин вместо технологически устаревшей 1,9 м/мин для цельного инструмента позволяет увеличить скорость в 2,2 раза без риска катастрофического износа. Это стало возможным благодаря использованию термостойкого твердого сплава с покрытием TiAlN.

Несмотря на увеличение подачи на зуб и вызванный этим рост силы резания на один зуб в два раза, увеличенный шаг сократил количество одновременно работающих зубьев. В итоге общее усилие протягивания для новой конструкции возросло всего на 34 %, оставаясь в безопасных пределах для стандартного оборудования.

Принятая в расчетах стойкость твердосплавной пластины ($T = 120$ мин) как минимум в два раза превышает стойкость быстрорежущей стали. При этом восстановление работоспособности цельной протяжки требует ее демонтажа, переточки и ведет к необратимому уменьшению размера инструмента. В случае с протяжкой со сменными пластинами износ компенсируется поворотом или заменой только изношенной пластины непосредственно в оснастке, без потери геометрии многогранного корпуса из стали 40Х.

В ходе работы цель по разработке и анализу сборной твердосплавной протяжки достигнута. Результаты расчетов и испытаний подтверждают, что новая конструкция обладает значительным технологическим потенциалом. За счет применения многогранных твердосплавных пластин с покрытием TiAlN удалось интенсифицировать режимы резания: скорость повышена до 4,22 м/мин, а подача на зуб – до 0,190 мм, что в комплексе сокращает основное время операции по сравнению с цельным быстрорежущим инструментом. Экономический эффект обеспечивается за счет многократного использования корпуса и быстрой замены лишь сменных пластин, что снижает эксплуатационные затраты в серийном производстве. Таким образом, разработанная протяжка представляет собой перспективную модернизацию, направленную на повышение производительности и эффективности обработки ответственных деталей из титановых сплавов. Основные направления для дальнейших исследований – оптимизация геометрии резания для исключения сколов и проведение полномасштабных производственных испытаний для окончательной верификации расчетных показателей стойкости и надежности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Протяжки для обработки отверстий / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1980. – С. 229.
2. Макаров, В.Ф. Исследование и разработка опытных конструкций сборных протяжек с непереключаемыми твердосплавными пластинами / В.Ф. Макаров, А.С. Приступов // Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 28–34.
3. Создание режущих твердосплавных пластин повышенной прочности для сборных инструментов / Е.В. Артамонов, Т.Е. Костив, М.О. Чернышов, Д.А. Русских // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 1 (64). – С. 106–113. – DOI: 10.47617/2072-3172_2023_1_106. – EDN AGOVNN.
4. Макаров, В.Ф. Повышение эффективности процесса скоростного протягивания на основе проектирования, расчета и оптимизации параметров сборных протяжек / В.Ф. Макаров, Г.Д. Петухов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 9 (204). – С. 44–47.
5. Макаров, В.Ф. Выбор и назначение оптимальных условий протягивания заготовок из труднообрабатываемых материалов / В.Ф. Макаров. – Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2008. – 396 с.
6. Гатиев, М.Ш. Особенности процесса формообразования отверстия процессом протягивания в труднообрабатываемых материалах / М.Ш. Гатиев, М.С. Мержоева, С.А. Чевычелов // Наука и бизнес: пути развития. – 2021. – № 3 (117). – С. 8–11.

ПРОФИЛИРОВАНИЕ КРУГЛЫХ ФАСОННЫХ РЕЗЦОВ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кротинов Н.Б., к.т.н., доцент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: ruslogos@gmail.com

Рассматривается методика определения профиля круглого фасонного резца с использованием технологии 3D-моделирования. Данная методика значительно снижает трудоемкость проектирования резцов, повышает их точность и расширяет возможности использования.

Ключевые слова: радиальный круглый фасонный резец, способы проектирования, профилирование, методика 3D-моделирования, САПР КОМПАС-3D

PROFILING ROUND SHAPED CUTTERS USING DIGITAL 3D MODELING

Krotinov N.B., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: ruslogos@gmail.com

This article discusses a method for determining the profile of a round shaped cutter using 3D modeling technology. This method significantly reduces the labor intensity of designing cutters, increases their accuracy and expands their use.

Keywords: radial round shaped cutter, design methods, profiling, 3D modeling technique, CAD KOMPAS-3D

Обработку фасонных деталей тел вращения, имеющих в качестве образующей линию, сочетающую в себе прямолинейные и криволинейные участки (рис. 1), можно производить следующими способами.

Первый заключается в раздельной обработке каждого из участков образующей на универсальном оборудовании при помощи универсального инструмента. Такой способ отличается низкой производительностью, точностью и повторяемостью, потребностью в рабочем высокой квалификации, поэтому используется только в единичном производстве.

Второй заключается в использовании оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), в котором все перемещения инструмента осуществляются программируемым контроллером по предварительно определенным координатам (интерполяцией). Такой способ позволяет рабочему невысокой квалификации (оператору) получить форму поверхности любой сложности с высокой точностью и повторяемостью, используя универсальный инструмент; однако предполагает применение дорогостоящего оборудования с высокой стоимостью станкочаса, потребностью в разработке управляющей программы и наладке станка рабочим средней и высокой квалификации (наладчиком). Способ применяется при серийном производстве.

Третий заключается в использовании специального инструмента, спроектированного и изготовленного под определенный профиль детали, такого как фасонные резцы. При таком способе не требуются дорогостоящее оборудование и рабочие высокой квалификации, а производительность выше, чем в станках с ЧПУ, с обеспечением высокого качества и повторяемости профиля детали. Недостатком, как и у всех специальных инструментов, являются дополнительные затраты на проектирование и изготовление инструмента, что делает его более дорогим по сравнению с универсальным. Способ используется в основном в крупносерийном и массовом производствах.

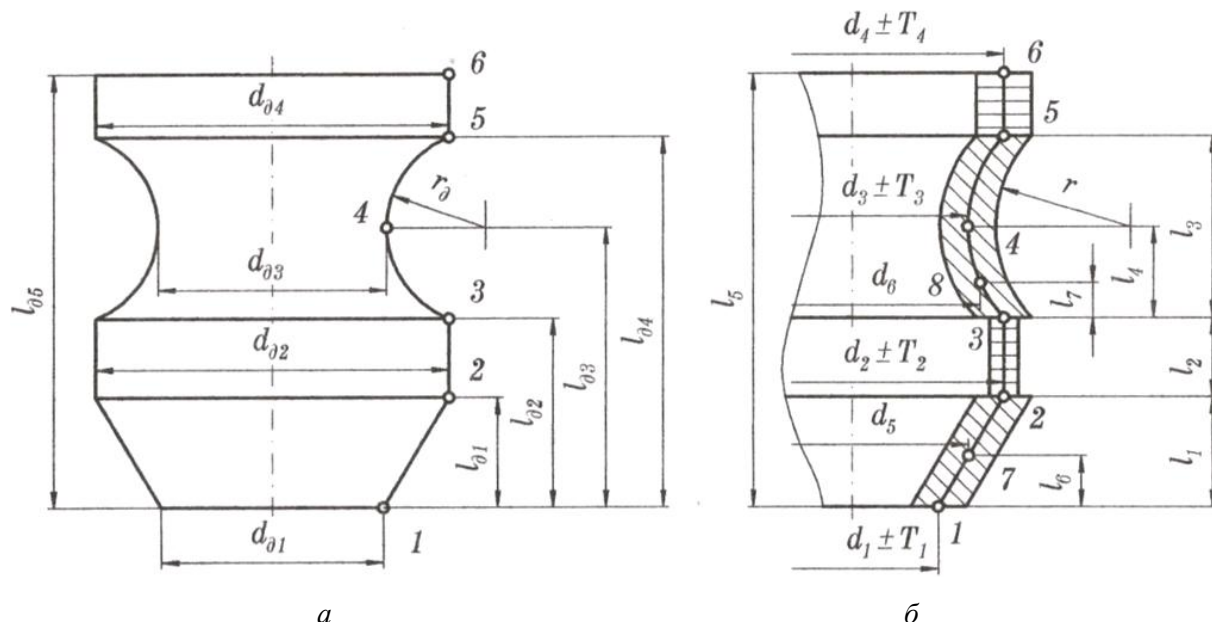


Рис. 1. Чертеж детали (а) и схема полей допусков (б) в различных точках детали

Снижение трудоемкости проектирования фасонных резцов позволит уменьшить их себестоимость и тем самым расширить область применения, а увеличение точности определения геометрии резца повысит точность обрабатываемой детали. Описанию решения этих задач и посвящена данная статья.

Наибольшую трудоемкость проектирования фасонных резцов составляет процесс определения профиля его рабочей части (профилирование). Необходимость профилирования возникает по следующей причине. С целью повышения эффективности обработки режущую часть резцов делают с положительными передним γ и задним α углами. Это уменьшает силы резания, улучшает отвод стружки, снижает вероятность образования нароста, увеличивает стойкость и пр. [1, 2, 3]. Однако при этом профиль резца не совпадает с профилем обрабатываемой им детали и требует проведения дополнительных коррекционных расчетов. Величина несовпадения тем больше, чем больше угол искажения профиля $\varepsilon = \alpha + \gamma$.

Рассмотрим последовательность аналитического способа определения профиля на примере круглого фасонного резца [1]. На профиле детали, под которую проектируется резец, обозначаются характерные узловые точки 1, 2, 3 и т. д., находящиеся в местах перехода участков образующей (рис. 1, а) [1, с. 74]. По диаметрам, заданным на чертеже ($d_{\partial 1}$, $d_{\partial 2}$ и др.) определяются соответствующие им расчетные диаметры d_1 , d_2 и др. в середине поля допуска (рис. 1, б, заштрихованная область). При необходимости также пересчитываются линейные размеры детали $l_{\partial 1}$, $l_{\partial 2}$ и др. в расчетные l_1 , l_2 и др. На конических (1–2) и дуговых (3–4–5) участках вводятся дополнительные точки 7 и 8, необходимые для расчета погрешности в этих точках при обработке, и определяются их координаты. Расчетные значения диаметров и осевых размеров определяются с точностью до 0,001 мм, после чего в зависимости от размера допуска эти значения могут округляться. Далее осуществляется выбор положения базовой точки или базовой линии, находящейся на пересечении передней поверхности резца и осевой плоскости детали и необходимой для установки резца в рабочее положение. От базовой точки (линии) задаются размеры других узловых точек, которые указываются в рабочем чертеже резца. В самом простом случае положение базовой точки (линии) выбирается проектировщиком на наименьшем диаметре детали и обозначается цифрой 1. После определения габаритных и других размеров резца выбираются величины передних γ и задних α углов в базовой точке, в зависимости от свойств обрабатывающего и обрабатываемого материала. Передний угол резца формируется путем заточки, а задний – путем смещения центра резца относительно центра вращения детали на величину $h_p = R_1 \sin \alpha$, где R_1 – радиус детали в точке 1. После этого выполняется коррекционный расчет профиля резца, суть которого сводится

к определению размеров каждой узловой точки в технологической (нормальной) $N-N$ и передней плоскости $\Pi-\Pi$ [1, рис. 3.22]. Эти размеры необходимы для изготовления и контроля резцов. При этом используется около шести трехчленных уравнения для каждой точки.

Снизить трудоемкость, повысить надежность, а также точность коррекционных расчетов можно путем использования цифрового 3D-моделирования детали и инструмента в какой-либо САД-системе. Приведем методику такого моделирования с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР) «КОМПАС-3D» на примере детали рис. 2 [1, с. 108] и сравним полученные данные размеров узловых точек в работе [1] с данной работой.

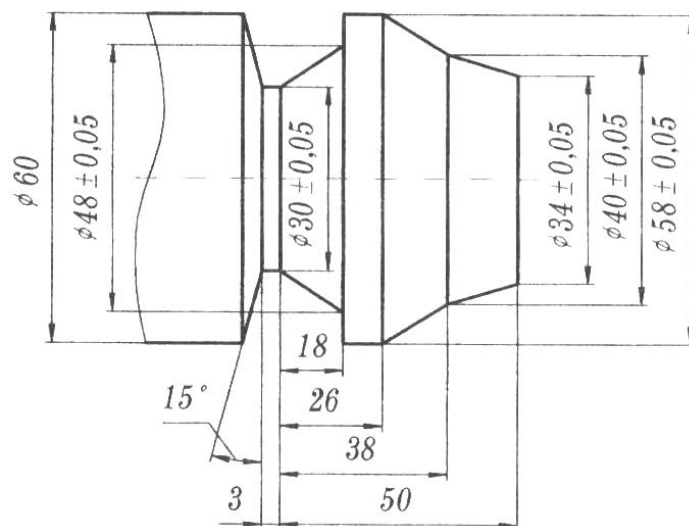


Рис. 2. Эскиз фасонной детали

Для начала построим 3D-модель детали и сделаем в ней вырез под углом искажения профиля ε с началом в базовой точке 1 (рис. 3).

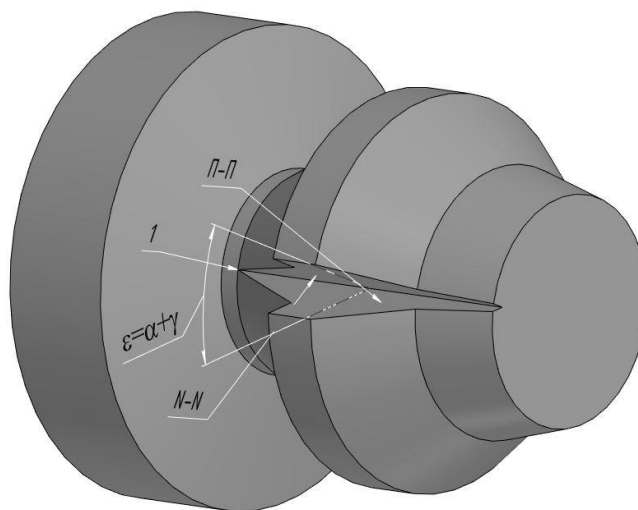


Рис. 3. Эскиз 3D-модели детали

Затем построим ось в технологической (нормальной) плоскости на расстоянии R_1 от точки 1, равном половине наружного диаметра резца (см. рис. 3, 4). Эта плоскость $N-N$ расположена нормально к задней поверхности резца [1, с. 94]. После этого спроецируем профиль детали на переднюю плоскость $\Pi-\Pi$, в которой контролируются размеры профиля резца после его изготовления [1, с. 94] (см. рис. 3, 5). Добавим к спроецированному профилю отрезки слева и справа, необходимые для прорезки канавки под отрезку и перекрытия резцом профиля детали в процессе ее изготовления.

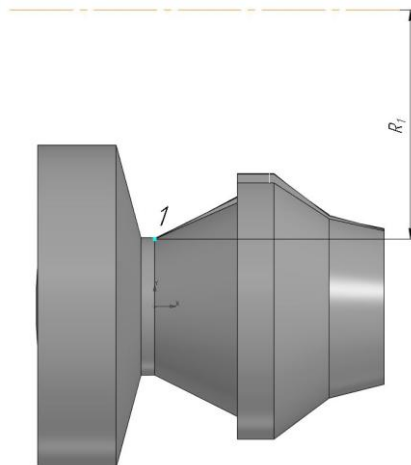


Рис. 4. Эскиз детали в технологической (нормальной) плоскости $N-N$

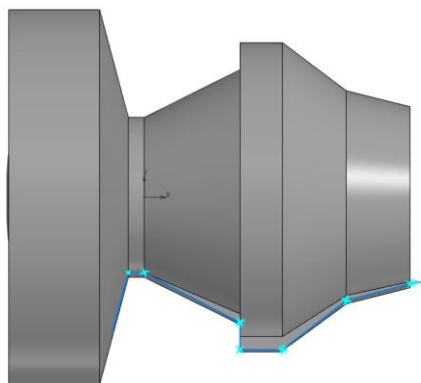


Рис. 5. Эскиз детали в передней плоскости $II-II$

Вращением спроецированного профиля, расположенного на плоскости $II-II$, вокруг оси, расположенной на плоскости $N-N$, выполним 3D-модель резца в первом приближении (рис. 6). САПР «КОМПАС-3D» в данном случае не позволяет выполнить цельную модель, только оболочку, но на данном этапе это не важно.

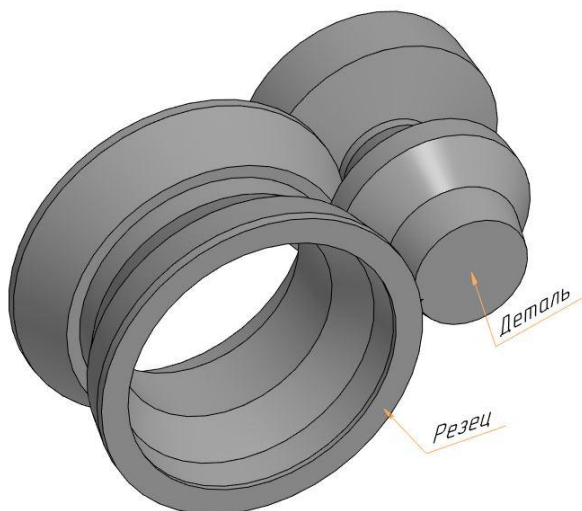


Рис. 6. Эскиз резца в первом приближении

Далее создадим еще одну нормальную плоскость резца, спроецируем на нее профиль и сделаем ось симметрии (рис. 7). Скопируем здесь же полученную ось и профиль для будущей модели.

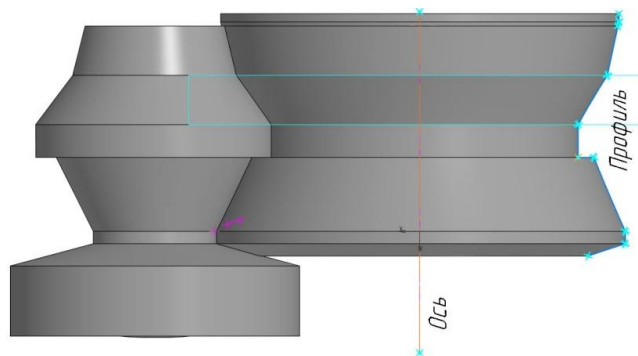


Рис. 7. Эскиз спроецированного профиля резца

Создадим новый файл 3D-модели, вставим в него скопированный ранее профиль и ось и операцией «Элемент вращения» сделаем 3D-модель резца во втором приближении. «Вырежем» в ней посадочное отверстие и стружечную канавку и получим окончательную модель резца (рис. 8).

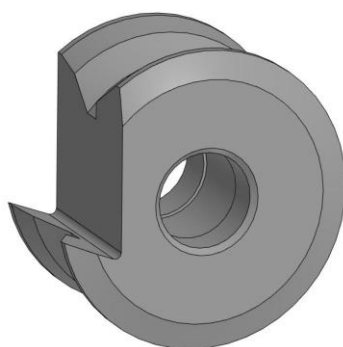


Рис. 8. Эскиз окончательной 3D-модели резца

Сравнение размеров профиля резца, полученного аналитически [1, с. 116], с размерами профиля по предлагаемой методике приведено на рис. 9.

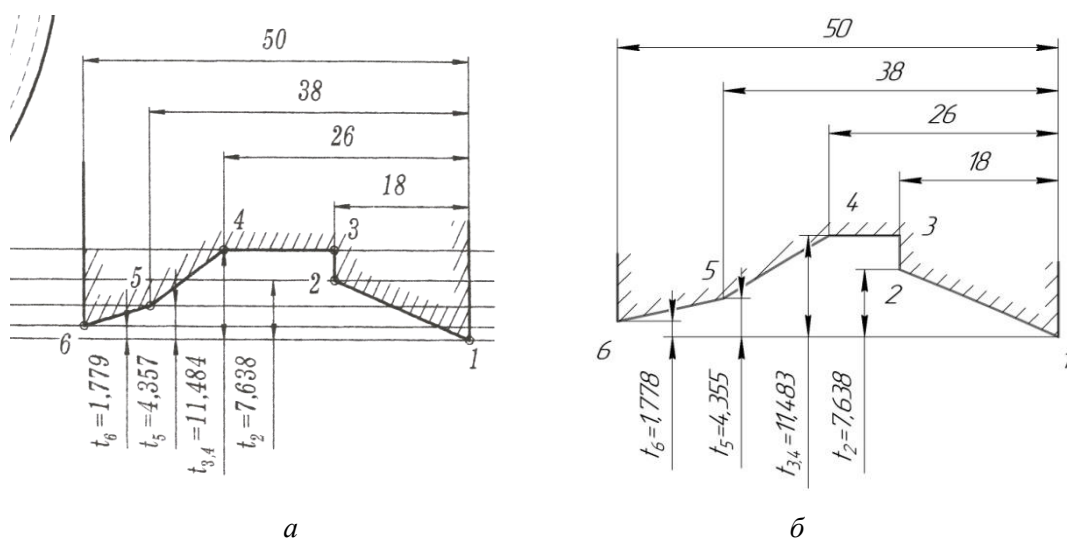


Рис. 9. Эскиз профиля резца, полученного аналитическим способом (а) и с помощью 3D-моделирования (б)

С целью проверки возможностей предлагаемой методики 3D-моделирования был также получен профиль резца, предназначенного для обработки фасонной детали, у которой образующей линией является кривая третьего порядка (рис. 10).

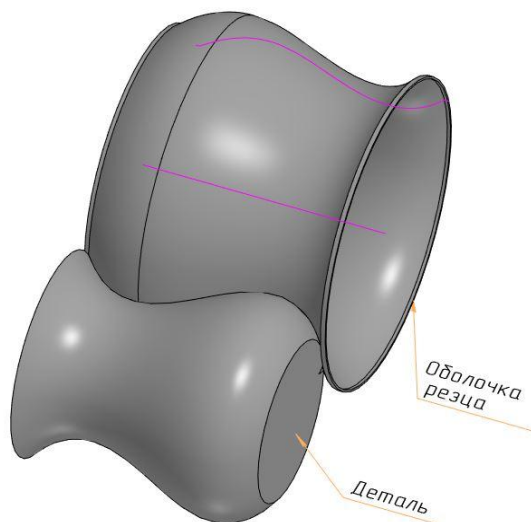


Рис. 10. Эскиз профиля резца, полученного с помощью 3D-моделирования

Результаты и их обсуждение

Сравнение полученных результатов (см. рис. 9) показывает, что размеры, относящиеся к ширине профиля (18, 26, 38, 50), совпадают на 100 %, так как внесение угла искажения профиля ϵ на них не отражается, поэтому коррекционному расчету они не подвергаются и принимаются такими, как есть. Размеры, относящиеся к высоте профиля (t_2 – t_6), незначительно отличаются (в тысячных долях). Связано это, по всей видимости, с погрешностью округления при расчетах. С практической точки зрения это отличие не имеет значения, так как на данном этапе развития технологии точением фасонными резцами нельзя получить деталь с точностью до 0,001 мм, и в дальнейшем на чертеже эти размеры округляются до сотых долей миллиметра.

Проверка возможностей предлагаемой методики 3D-моделирования показала, что с ее помощью можно получать профиль резца высокой сложности (см. рис. 10). При использовании аналитического способа такой профиль пришлось бы разбивать на ряд простых участков с неизбежным внесением погрешностей при расчетах.

Выводы

Предлагаемая методика цифрового 3D-моделирования значительно снижает трудоемкость проектирования круглых фасонных резцов, искомый профиль получается с высокой точностью форм любой сложности, используемых на практике. Цифровые 3D-модели резцов можно в дальнейшем использовать для создания рабочих чертежей, а также программ обработки на станках с ЧПУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование металлорежущего инструмента: учебник / Г.А. Мелетьев, А.Г. Схиртладзе, В.Е. Шебашев, Л.Н. Шобанов. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 388 с.
2. Резание металлов и режущие и инструменты: учеб. пособие / В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин. – Москва: Инфра-М, 2018. – 414 с.
3. Проектирование фасонных резцов: методические указания по выполнению курсовых, практических и контрольных работ / Н.Д. Папшева, О.М. Акушская. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2022. – 36 с.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ВИБРАЦИИ ОПОР ДВИГАТЕЛЕЙ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Малкина И.В., старший преподаватель

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: malkina_dom@mail.ru*

Описан процесс контроля вибросостояния опор двигателя НК-16СТ. Представлена автоматизированная система контроля вибраций с использованием пьезоэлектрических вибропреобразователей, подобраны блоки автоматической обработки данных. Разработано метрологическое обеспечение проектного варианта с описанием методики выполнения измерения и контроля.

Ключевые слова: измерительный процесс, контроль, метрологическое обеспечение, датчики вибрации

METROLOGICAL SUPPORT FOR MONITORING THE VIBRATION LEVEL OF ENGINE SUPPORTS IN POWER PLANT SYSTEMS

Malkina I.V., senior lecturer

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: malkina_dom@mail.ru*

The article describes the process of monitoring the vibration condition of the NK-16ST engine supports. An automated vibration monitoring system using piezoelectric vibration transducers is presented, and automatic data processing units are selected. The metrological support of the design version is developed, and the measurement and control methodology is described.

Keywords: measurement process, monitoring, metrological support, vibration sensors

Измерение и контроль необходимых параметров является одной из важнейших задач контроля качества измерительного процесса. Данная информация не только позволяет правильно оценить работу промышленного оборудования, но и дает возможность своевременно обеспечить корректировку работы комплектующих узлов, не допуская значительного отклонения выходных параметров. Целью представленной работы является разработка метрологического обеспечения процесса контроля вибрации опор силовых установок двигателей для предотвращения возможных сбоев и разрушений целостности конструкции.

В качестве объекта исследования выбран двигатель НК-16СТ, конструкция разработана в опытно-испытательном бюро академика Н.Д. Кузнецова. В качестве базовой модели анализировался авиационный двухконтурный двигатель НК-8-2У, являющийся силовой установкой самолетов серии ТУ-154Б [4, 5].

Двигатели серии НК-16-18СТ находят свое применение не только в авиастроении, они широко используются в нефтегазовой промышленности в составе электрогенераторов и газотурбинных агрегатов, могут работать в составе газоперекачивающего оборудования и газокompresсорных станций [4, 5]. Внешний вид данной модификации двигателя представлен на рис. 1.

Современные методы диагностики и контроля технического состояния промышленного оборудования значительно повышают ресурс его работы за счет своевременного определения неисправностей, возможности их устранения до момента образования сбоев и отказов, что позволяет избегать серьезных производственных аварий.

На автоматизированную систему контроля возлагают такие функции, как непрерывная регистрация и оценка контролируемых параметров; блокировка пуска двигателя в случае возникновения сигнала опасности; генерация предупреждающих и управляющих сигналов;

хранение архивированных данных; передача визуализированной информации о состоянии объекта на пульт оператора. Оператор получает доступ к информации об уровне вибрации в опорах силовой установки, изменении температуры и давления масла в системе, частоте вращения статора и ротора при запуске и работе двигателя, положении аварийных заслонок, загрязненности фильтров, стабильности напряжения сети и др.

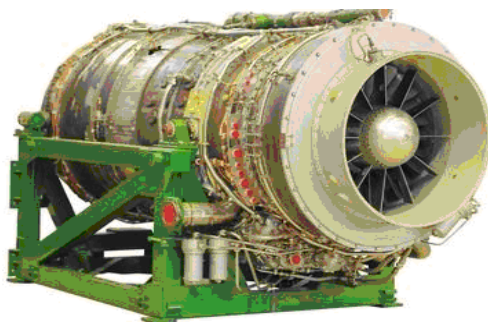


Рис. 1. Вид газотурбинного двигателя НК-16СТ

По изменению уровня вибрации можно косвенно судить о техническом состоянии двигателя, например, начинающегося разрушения в узлах. Именно это делает данный параметр контроля одним из приоритетных.

Помочь диагностировать вибрационное состояние двигателей позволяют специально разработанные методики. Для диагностики вибрационных режимов используется виброаппаратура, действие которой определяют различные принципы преобразования сигнала. Механизм преобразования может значительно влиять на конструктивное исполнение и значительно упрощать измерительный процесс, поэтому при выборе средств измерения следует обращать внимание не только на точность снятия показаний, но и на ценовой барьер.

Именно этот критерий позволил выбрать оптимальное измерительное оборудование, использующее в своей основе пьезоэлектрические вибропреобразователи.

На рис. 2 представлена общая структурная схема автоматизированной системы контроля вибрации двигателя.



Рис. 2. Структурная схема системы контроля:

ОИ – объект измерения; Д – датчик; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь,
АСК – автоматизированная система контроля

Датчики позволяют снимать данные с контролируемого объекта, преобразуют его в удобную форму (электрический параметр) и передают для дальнейшего анализа на дисплей оператора.

Техническое устройство ИВ-Д-ПФ-2М-3.1-01, представленное на рис. 3, позволяет непрерывно оценивать возникающие в двигателе вибрации, а также сигнализирует о критическом превышении контролируемых параметров. Преимуществами данного оборудования являются его долговечность (заявленный разработчиками срок службы 25 лет) и возможность использования как для внешнего анализа путем размещения в зоне контроля с последующим удалением, так и для внутреннего мониторинга за счет вмонтирования в консоль измерительной системы [1, 6].

Работа устройства осуществляется тремя пьезоэлектрическими преобразователями серии МВ-43 (рис. 4). Принцип действия данных датчиков основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте. Поверка пьезоэлектрического датчика МВ-43-5Б осуществляется в соответствии с ГОСТ ИСО 5348- 2002 [2, 6].

Действительное значение коэффициента преобразования датчика определяется формулой

$$K_{\text{ДА}} = \frac{U_6}{\gamma_{\text{СУ}} \cdot a_{\text{Д}}}, \text{ пКл/мс}^{-2}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ДА}}$ – действительное значение коэффициента преобразования, мВ/мс⁻² (пКл/мс⁻²);
 U_6 – показание эталонного вольтметра, мВ;
 $a_{\text{Д}}$ – значение виброускорения от эталонной виброустановки, м/с²;
 $\gamma_{\text{СУ}}$ – коэффициент передачи согласующего усилителя (при отсутствии СУ $\gamma_{\text{СУ}} = 1$).



Рис. 3. Устройство для контроля вибраций
ИВ-Д-ПФ-2М-3.1-01



Рис. 4. Внешний вид датчика МВ-43

Действительное значение коэффициента преобразования должно соответствовать нормативным значениям, указанным в электронной документации [3, 6]. Схема подключения эталонного поверочного оборудования изображена на рис. 5.

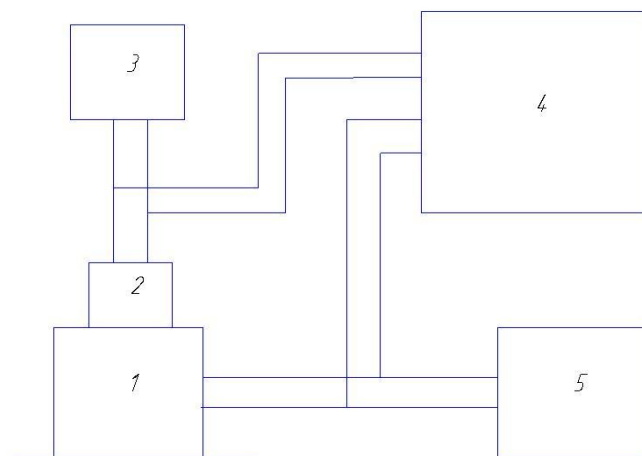


Рис. 5. Схема подключения поверочного оборудования:
1 – вибровозбудитель; 2 – проверяемый объект; 3 – вольтметр;
4 – осциллограф; 5 – генератор частоты

После прохождения через первичные преобразователи информация о вибрационных нагрузках в виде электрических сигналов передается в электронные блоки серии БЭ-38 и БЗ-39 для дальнейшей обработки [4, 5]. Общая структурная схема вибрационного контроля состояния объекта представлена на рис. 6.

Методика выполнения измерений (МВИ) – одна из важных составляющих метрологического обеспечения измерительного процесса. Важно не только правильно подобрать и скомпоновать измерительное оборудование, но и составить точный алгоритм снятия показаний во избежание возникновения дополнительных погрешностей в ситуационной оценке. Общие требования к разработке, оформлению и аттестации МВИ определены ГОСТ Р 8.669-2009 и МИ 1873-88.

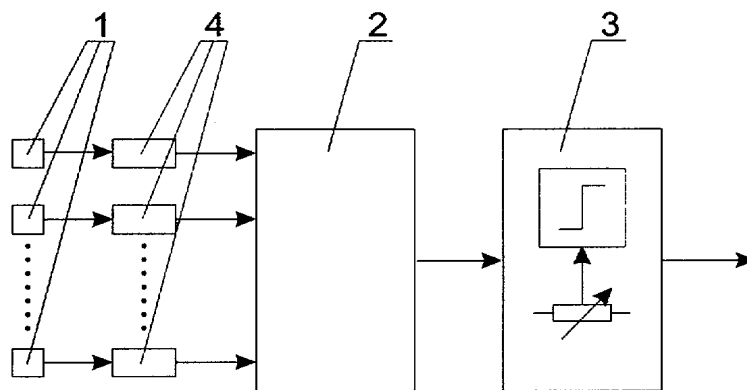


Рис. 6. Блок-схема вибрационного контроля состояния объекта:
1 – датчики вибрации; 2 – блок сравнения; 3 – пороговый элемент и независимый источник вибрационных колебаний; 4 – компенсаторы

Представленная на рис. 6 компоновка информационно-измерительной системы (ИИС) делает удобным дальнейший анализ сигналов, поступающих с датчиков: можно вычленять приоритетные частоты, сравнивать между собой сигналы вибродатчиков, сопоставлять получаемую информацию с пороговыми значениями и в случае превышения таковых выдавать сигнал о возможном нарушении целостности конструкции.

Информационно-измерительная система выполняет такие функции, как фиксация и вывод на пульт оператора значений частоты вращения ротора; снимает показания виброскорости; сообщает о превышении базовых показателей и возникновении аварийной опасности; осуществляет возможность дистанционной остановки двигателя; определяет место опасного превышения уровня сигнала, а также проводит мониторинг всех узлов и механизмов в целом. Все это оптимизирует и упрощает процесс контроля.

Внедрение современных автоматизированных технических средств для контроля вибрационного состояния силовых опор двигателей позволяет добиться точности измерений, ускорить процесс сбора и обработки данных, повысить надежность эксплуатируемого оборудования, сократить общие затраты на производство.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 8.669-2009. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки.
2. ГОСТ ИСО 8042-2002. Вибрация и удар. Датчики инерционного типа для измерения вибрации и удара.
3. Методика поверки. МИ 1873-88. ОКСТУ 0008.
4. Двигатель НК-16СТ конструкции ОКБ Кузнецова [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.turbunist.ru/6830-rte-gtd-nk-16st.html>
5. НК-16СТ – презентация: Презентационные материалы Кафедра «Турбины и двигатели» УГТУ-УПИ [Электронный ресурс]. – URL: <https://showslide.ru/nk-16st-148444?ysclid=ml0m5ql93u406085271>
6. Вибропреобразователь тип МВ-43 [Электронный ресурс]. – URL: <http://vpribor.spb.ru/production.php?a=1&id=32>

**РАСЧЕТ ДОПУСТИМОЙ ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СТРЕЛОЧНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОПТИЧЕСКОМ СЧИТЫВАНИИ
ИХ ПОКАЗАНИЙ**

Михрютин В.В., к.т.н., доцент

*Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева,
г. Рыбинск, Российская Федерация
E-mail: v_mihrutin@rsatu.ru*

На базе матричных геометрических преобразований в трехмерном пространстве разработан метод расчета допустимой погрешности установки стрелочных приборов при автоматизированном оптическом считывании их показаний. Выполнены контрольные расчеты и прорисовки в пакете Mathcad геометрических образов стрелок и шкал с учетом погрешности установки измерительных приборов.

Ключевые слова: стрелочные приборы, оптическое считывание показаний, погрешность установки манометров при считывании показаний, параллакс при измерениях, расчет погрешности параллакса

**CALCULATION OF THE PERMISSIBLE INSTALLATION ERROR
OF POINTER DEVICES WITH AUTOMATED OPTICAL FIXING
OF THEIR READINGS**

Mikhryutin V.V., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation
E-mail: v_mihrutin@rsatu.ru*

Based on matrix geometric transformations in three-dimensional space, a method has been developed for calculating the permissible error of installing pointer devices during automated optical fixing of their readings. Control calculations and generation of geometric images of arrows and scales in the Mathcad package were performed, taking into account the error in the installation of measuring instruments.

Keywords: pointer devices, optical fixing of readings, the error of installing pressure gauges when fixing their readings, parallax in measurements, calculation of parallax error

Стрелочные приборы нашли широкое применение в различных областях техники. В оборудовании промышленных предприятий широко используются стрелочные манометры, которые регулярно должны проходить поверку для обеспечения точности их показаний. При поверке манометров перспективным является метод автоматизированного оптического считывания их показаний с использованием специальных автоматизированных стендов.

Поскольку установка и закрепление поверяемых манометров на стендах в резьбовых соединениях производятся вручную, а манометры могут иметь различные размеры и конфигурации, положение поверяемого манометра при измерении отличается от идеального, что приводит к искажению изображения, формируемого оптическим считывающим устройством. Искажения этого изображения напрямую влияют на результаты поверки и при определенных условиях могут привести к ошибочным результатам.

Анализ технической литературы показал, что существуют методы экспериментального установления величины допустимых углов считывания, основанные на использовании упрощенной плоской расчетной схемы, заменяющей решение пространственной задачи [1, 2].

Поэтому актуальной является задача разработки аналитического метода расчета величины погрешности измерения в зависимости от погрешности установки поверяемого стрелочного прибора с круговой шкалой.

Развитие методов автоматизированного оптического считывания показаний стрелочных приборов позволяет значительно повысить производительность и точность измерений, а также исключить субъективный фактор восприятия человека. Однако в известной технической литературе отсутствуют сведения о математическом аппарате, позволяющем аналитически рассчитать погрешность считывания при известных угловых и линейных отклонениях центральных осей стрелочного прибора и оптического устройства.

В данной работе предлагается реализовать такой математический аппарат на основе матричных преобразований в расширенном пространстве (однородных координатах).

Расчетная схема возникновения погрешности от искажения изображения при угловом отклонении положения стрелочного прибора 1 от заданного показана на рис. 1. Считывающий оптический прибор вместо круговой шкалы фиксирует эллиптическую, при этом угловое расположение проекций штрихов шкалы и измерительной стрелки отличается от реального.

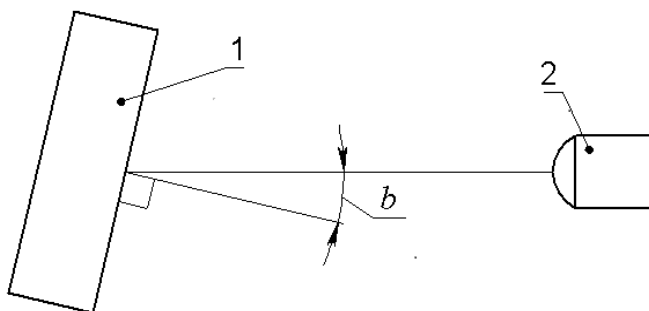


Рис. 1. Схема возникновения погрешности измерения при угловом отклонении

Расчет погрешности считывания углового положения стрелки от угла установки измерительной шкалы производится на основе создания математической модели ее геометрического образа, задающей размер и относительное положение штрихов измерительной шкалы.

Уравнение линии, описывающей штрих деления шкалы, записывается с учетом следующих геометрических преобразований пространства:

$$S(c, x) = [x \cos c \quad x \sin c \quad 0]^T, c \in (\varphi_0, \varphi_S), x \in (r_0, r_1), \quad (1)$$

где c – угловое положение штриха относительно шкалы;
 x – координаты начальной и конечной точек штрихов;
 φ_0 – угол расположения начального штриха шкалы;
 φ_S – угловой размер круговой шкалы прибора;
 r_0 и r_1 – радиусы расположения начальной и конечной точек штрихов.

В процессе построения моделей сделано допущение, что оптический считывающий прибор расположен на достаточно большом расстоянии от поверяемого манометра, поэтому использовалось параллельное проецирование.

При автоматизированном измерении считываются угловое положение измерительной стрелки, соответствующее штрихам шкалы [3]. Угловая погрешность считывания положения стрелки возникает при угловом отклонении манометра при повороте вокруг оси резьбового соединения, которое моделируется последовательным преобразованием поворота и ортогонального проецирования векторного уравнения штрихов шкалы (1), соответствующих положению стрелки измерительного прибора

$$S_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos b & 0 & \sin b \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin b & 0 & \cos b \end{bmatrix} S(c, x), \quad (2)$$

где b – угол поворота круговой шкалы.

Преобразования уравнения (2) позволили получить уравнение, описывающее форму проекции штрихов круговой шкалы на картинную плоскость, в которой формирует изображение оптический прибор:

$$S_r(x, c, b) = \begin{bmatrix} x \cdot \cos^2 b \cdot \cos c \\ x \cdot \sin c \\ 0 \end{bmatrix}, c \in (\varphi_0, \varphi_s), x \in (r_0, r_1), b \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right). \quad (3)$$

Уравнения (1) и (3) задают векторы соответственно идеального положения штрихов шкалы и стрелки идеальных показаний стрелочного прибора и считанных со шкалы прибора, повернутых на некоторый угол. Величина погрешности определения угла расположения штриха или стрелки прибора, установленного с угловой погрешностью, определяется по уравнению

$$a = \frac{S(c, r_0) S_r(r_0, c, b)}{[S(c, r_0)] S_r(r_0, c, b)}. \quad (4)$$

Расчеты по этому уравнению и вычисление угла a между фактическим и отображаемым положением стрелки, проведенные в пакете Mathcad, показали, что наибольшая угловая погрешность циклически меняется вдоль круговой шкалы, а ее наибольшая величина достигается при положении стрелки, равном 45° к горизонту (рис. 2).

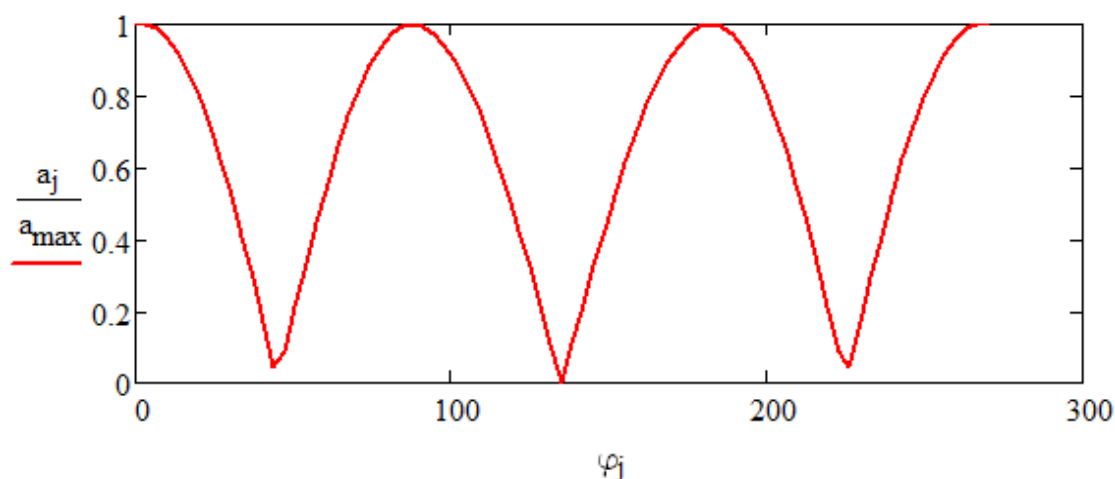


Рис. 2. Расчетное изменение относительной погрешности вдоль круговой шкалы

Поскольку уравнения (3), (4) имеют векторный вид и являются трансцендентными, для определения допустимого угла отклонения установки манометра b решаются численно.

Расчеты показывают, что угловая погрешность установки манометра приводит также к возникновению погрешности определения автоматизированным методом угловой величины круговой шкалы. Величина такой погрешности рассчитывается с учетом угла между проекциями начальной и конечной рисок на картинную плоскость оптического прибора.

Далее вычислим величину допустимого угла наблюдения, определяемую явлением параллакса, возникающим при линейном смещении осей стрелочного и оптического прибора.

Расчетная схема возникновения погрешности параллакса от несоосности установки стрелочного и оптического приборов представлена на рис. 3. При возникновении такой погрешности оси стрелочного 1 и оптического 2 приборов смещаются на расстояние l . Стрелка прибора отстоит от круговой шкалы на расстояние h . Считаем приборы достаточно удаленными друг от друга, поэтому пренебрегаем погрешностью использования параллельного проецирования. При этом луч проецирования получается наклоненным под углом b к осям приборов.

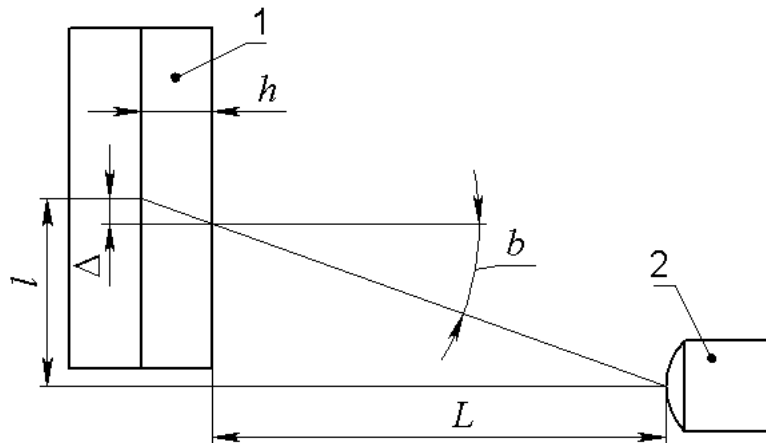


Рис. 3. Схема возникновения погрешности параллакса

Расчетная оценка величины параллакса стрелки и шкалы вычислялась путем вычисления параметров косоугольного проецирования на картинную плоскость формирования изображения оптического считывающего устройства.

Построение косоугольной проекции в данном случае аналогично проецированию при повороте стрелочного прибора на угол, определяемый расстоянием L между считывающим и поверяемым приборами и эксцентриситетом их осей l . Угол b при таком преобразовании определяется как соотношение катетов прямоугольного треугольника:

$$b = \arctg \frac{l}{L} . \quad (5)$$

Определенный таким способом угол b подставляется в уравнения для штрихов шкалы и стрелки, получаемых аналогично зависимостям (3), (4). Далее по ним производятся соответствующие расчеты.

Результаты отрисовки модели геометрического образа круговой шкалы и отстоящей от нее на расстоянии h стрелки при смещении центра круговой шкалы от оси считывающего прибора, произведенной по уравнениям (5), (3), показаны на рис. 4. Возникающий параллакс между штрихами шкалы и стрелкой оценивается углом между их проекциями на картинную плоскость формирования изображения оптическим считывающим прибором по уравнению (4).

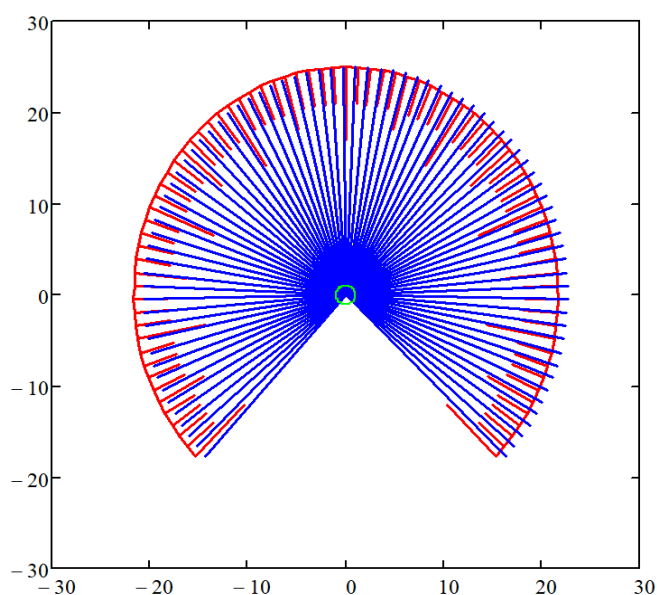


Рис. 4. Результаты отрисовки моделей геометрического образа круговой шкалы и стрелки

Для расчета допустимой величины смещения осей шкалы поверяемого прибора и считывающего устройства необходимо решать трансцендентное уравнение с использованием одной существующих систем инженерных и научных расчетов с использованием соответствующих математических библиотек.

Адекватность полученных расчетных зависимостей была проверена геометрическими построениями в трехмерном пространстве во внешней CAD-системе. Получено точное совпадение результатов.

В результате проведенной работы на основе математического аппарата матричных геометрических преобразований в трехмерном пространстве создан метод расчета допустимой погрешности установки измерительных стрелочных приборов при автоматизированном оптическом считывании их показаний. Выполнены контрольные расчеты и прорисовки в пакете Mathcad геометрических образов стрелок и шкал с учетом погрешности взаимной установки поверяемого и считывающего оптических приборов.

Предлагаемый математический аппарат использует базовые функции, реализуемые во всех прикладных математических библиотеках языков программирования высокого уровня, а также математических пакетах для инженерных и научных расчетов.

Предложенные математические модели легко интегрируются в программное обеспечение автоматизированных оптических считывающих приборов, что позволяет повысить точность, достоверность и производительность проводимых измерений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гонек, Н.Ф. Манометры: учебное пособие / Н.Ф. Гонек. – Ленинград: Машиностроение, 1979. – 175 с.
2. Киселев, С.К. Использование тестового метода повышения точности измерений при автоматизированном оптическом считывании показаний щитовых стрелочных приборов / С.К. Киселев, Д.Г. Шабаев // Вестник УлГТУ. – 2005. – № 1. – С. 44–46.
3. Поликарпов, К.М. Система компьютерного зрения для определения показаний манометров / К.М. Поликарпов // XXV Туполевские чтения (Школа молодых ученых). Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ. – Т. IV. – Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021.

ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОБРАЗА ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ

Михрютин В.В. , к.т.н., доцент, Михрютин А.В., аспирант

*Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева,
г. Рыбинск, Российская Федерация
E-mail: v_mihrutin@rsatu.ru*

В условиях цифрового производства актуальным является создание автоматизированной компьютерной системы, позволяющей производить комплексное физическое моделирование процесса обработки на основе использования подмоделей режущего инструмента, заготовки, станка и самого процесса резания. В работе рассмотрено построение модели геометрического образа формирования стружки. Выполнены контрольные расчеты и их визуализация для модели с единственной плоскостью сдвига. Предполагается распространение результатов на решение пространственной задачи стружкообразования.

Ключевые слова: процесс резания, стружкообразование, модель геометрического образа формирования стружки, визуализация процесса стружкообразования, текстура стружки

PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF A GEOMETRIC IMAGE MODEL OF THE CHIP FORMATION PROCESS DURING CUTTING

Mikhryutin V.V. , PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Mikhryutin A.V., PhD student

*Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation
E-mail: v_mihrutin@rsatu.ru*

The implementation of the modern digital manufacturing paradigm requires developing a software solution to allow for complex physical modeling of the machining process. The software solution would comprise several submodels, namely the submodels of the cutting tool, the workpiece, the machine and the cutting process itself. The model for the process of chip formation is considered in this paper. Control calculations and their visualization were performed for a model with a single shear plane. This model can be used as a basis for the development of a future spatial model of chip formation.

Keywords: cutting process, chip formation, chip formation models, visualization of the cutting process, chip texture

В условиях современного цифрового производства изготовление деталей производится на станках с ЧПУ, управляющие программы для которых разрабатываются с использованием автоматизированных САМ-систем. Общим недостатком этих систем является отсутствие инструментов назначения режимов резания и последующего моделирования процесса обработки, позволяющего более точно прогнозировать выходные показатели эффективности выполняемой технологической операции и качества обработанной поверхности. Указанные обстоятельства в ряде случаев приводит к повышенным затратам машинного времени, расходу дорогостоящего инструмента, необходимости последующей доработки либо появлению неисправимого брака заготовок. Повышение производительности и качества обработки на станках с ЧПУ возможно за счет создания программных систем, позволяющих выполнять комплексное моделирование процессов, протекающих в технологической системе, до реализации процесса на станке. Для построения такой модели требуется разработка ряда подмоделей режущего инструмента, заготовки, станка и самого процесса резания [1]. Создание такой системы в настоящее время весьма актуально, а ее отсутствие существенно сдерживает рост эффективности производства.

Целью данной работы является анализ предпосылок разработки модели геометрического образа процесса деформирования срезаемого материала с учетом известных моделей стружкообразования.

Образование обработанной поверхности при обработке резанием происходит за счет пластического деформирования материала припуска с образованием стружки. Резание производится при высоких скоростях, этот процесс сопровождается интенсивным выделением тепла, обусловленным процессами пластической деформации стружки и трением на контактных поверхностях инструмента. Процессы стружкообразования, трения на передней и задней поверхностях инструмента и распространения тепла при резании принято выделять в отдельные подмодели, входными параметрами которых являются свойства обрабатываемого материала, форма и размеры сечения среза, а также скорости и траектории перемещения инструмента относительно заготовки. Выходными параметрами подмоделей являются величина и направление действия силы резания, напряженно-деформированное состояние обрабатываемой поверхности, влияющее на формирование ее шероховатости, появление остаточных напряжений, а также величину износа инструмента.

Значительный вклад в силовое воздействие вносят также процессы трения на задней поверхности инструмента.

Построение модели силового взаимодействия инструмента и заготовки при резании производится на основе существующих представлений о процессах упругопластической деформации и принципов построения известных расчетных моделей в данной области.

При взаимодействии инструмента с заготовкой обычно принимается допущение, что режущий клин является идеально жестким, и его упругими деформациями пренебрегают. При этом обрабатываемый материал в зоне резания подвергается упругим и пластическим деформациям, возникает деформированное состояние. Изучению деформированного состояния при резании посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ.

Наиболее распространенной является схема, в которой пластически деформируемую зону представляют в виде бесконечно тонкой плоскости, наклоненной к направлению скорости под углом β_y [2, 3]. В современной литературе обычно используется термин «угол наклона условной плоскости сдвига». Процесс резания описывается как процесс последовательных смещений срезаемого слоя при прохождении его объема через упомянутую плоскость. Данная модель основана на целом ряде довольно грубых допущений и противоречит целому ряду научных положений, но тем не менее позволяет рассчитать ряд параметров процесса.

Угол наклона условной плоскости сдвига определяется с учетом величины переднего угла и коэффициента утолщения стружки.

Деформации сдвига и скорости деформирования стружки при резании металлов значительно выше, чем при испытаниях на растяжение и операциях обработки металлов давлением. Геометрия деформирования стружки показана на схеме ниже (рис. 1).

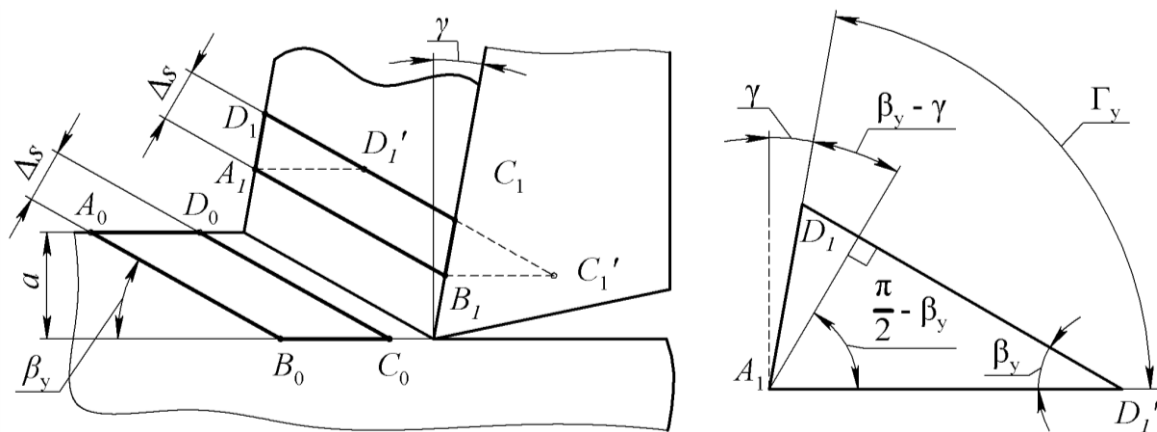


Рис. 1. Определение величины угла деформации сдвига

Анализ рис. 1 позволяет определить величину угла сдвиговой деформации через величину переднего угла

$$\Gamma_y = \frac{\pi}{2} - \gamma, \quad (1)$$

где γ – величина переднего угла инструмента, рад.

Параметр геометрического преобразования сдвига составит величину [4]

$$\gamma_y = \operatorname{tg}(\beta_y - \gamma) + \operatorname{ctg}(\beta_y) = \frac{\cos \gamma}{\sin \beta_y \cos(\beta_y - \gamma)}, \quad (2)$$

где β_y – величина угла наклона условной плоскости сдвига, рад.

Поскольку условная плоскость сдвига рассматривается как аналог линии скольжения, вдоль нее нормальное напряжение равно нулю, а касательное напряжение постоянно. При этом деформация материала в направлении, параллельном режущей кромке, пренебрежимо мала, и рассматриваемую задачу относят к случаю плоского деформированного состояния.

Тензоры напряжений и деформаций для такого куба с учетом принятой схемы напряженного состояния будут записаны в следующем виде:

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \tau_p \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ -\tau_p & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}, \quad T_\varepsilon = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}\gamma_{xy} \\ -\frac{1}{2}\gamma_{yx} & 0 \end{bmatrix}, \quad \sigma_y = \frac{\sigma_z}{2}, \quad (3)$$

где T_σ, T_ε – тензоры напряжений и деформаций;

σ_y, σ_z – компоненты тензора напряжений относительно осей x и z , Па;

τ_p – касательное напряжение в условной плоскости сдвига, Па;

γ_{xy}, γ_{yx} – относительные сдвиговые деформации.

В тензоре деформаций (3) относительные удлинения $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ в его главной диагонали равны нулю, поскольку изменения размеров вдоль осей y и z не происходит.

Для моделирования процесса срезания стружки необходимо на основе тензора деформаций определить параметры соответствующего геометрического преобразования. Для этого заменим в тензоре деформаций (3) компоненты угловых деформаций на величину параметра геометрического преобразования (2) и сместим начало координат в левый нижний угол рассматриваемого объема. Затем добавим координату расширенного (однородного) пространства для упрощения записи последующих матричных преобразований.

Матрица геометрического преобразования простого сдвига в расширенном двухмерном пространстве примет вид

$$M_c = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Поскольку рассматриваемая матрица задает сдвиг вдоль горизонтальной оси, для моделирования деформирования стружки требуется выполнить дополнительные преобразования линейного перемещения и поворота по следующей схеме:

$$M = T_{xz}(x, z)R(\beta_y)M_cR(-\beta_y), \quad (5)$$

где $T_{xz}(x, z)$ – матрица поступательного перемещения в однородном пространстве;

$R(\beta_y)$ – матрица поворота вокруг оси y .

На рис. 2 показаны результаты моделирования и последующей визуализации формирования сливной стружки с использованием предложенного геометрического преобразования (5) прямоугольной сетки, нанесенной на срезаемый слой.

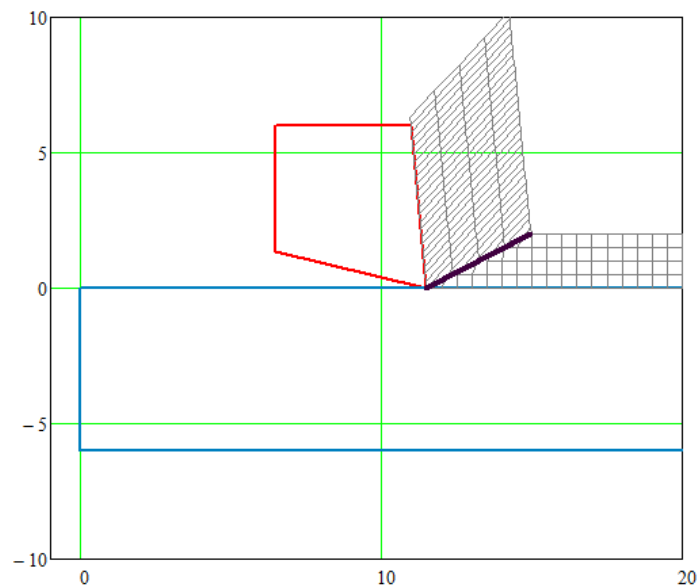


Рис. 2. Визуализация срезаемого слоя путем нанесения прямоугольной сетки

При анализе процесса резания практический интерес представляет анализ формирования текстуры стружки. Для этого произведено моделирование съема стружки при разбиении припуска окружностями (рис. 3). Угол текстуры стружки находится по ориентации главных осей эллипса, в который деформируется окружность на основе матричных преобразований, аналогичных уравнению (5). Разработанный математический аппарат может быть трансформирован для пространственных задач.

В моделях с единственной плоскостью сдвига из рассмотрения исключаются контактные процессы на передней поверхности инструмента, что не позволяет описывать процесс завивания стружки. Это является их серьезным недостатком.

При рассмотрении скоростей движения срезаемого металла и стружки данная схема предполагает скачкообразное изменение скорости материала при его переходе через условную плоскость сдвига. Скачкообразное изменение скорости означает бесконечное значение ускорения, учитываемого при расчете силы инерции от массы стружки, действующей на переднюю поверхность инструмента. Поэтому схема не может учесть инерционные силы, возникающие при резании [5, 6].

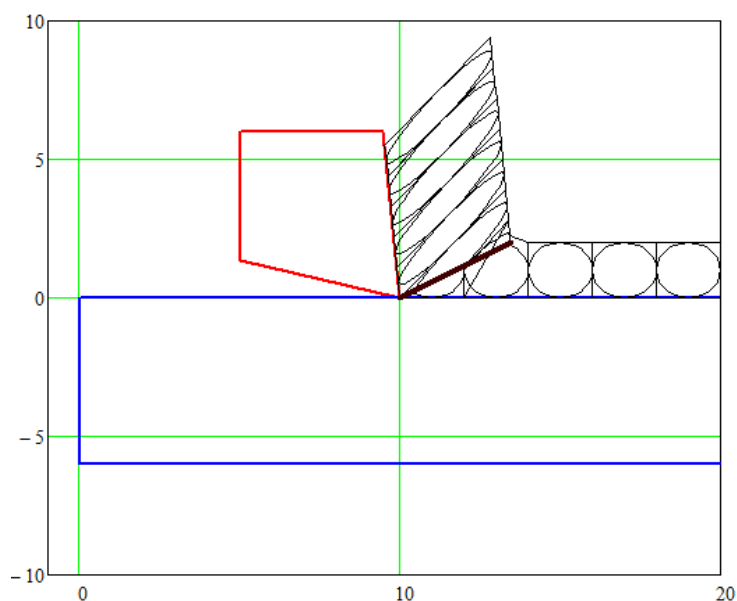


Рис. 3. Визуализация срезаемого слоя окружностями

Большой интерес при моделировании процесса стружкообразования представляют работы, направленные на построение моделей пластического деформирования на основе уравнений движения Коши и Эйлера [7], позволяющих создать более точную и с физической, и кинематической точки зрения непротиворечивую модель [5, 6]. Однако этот путь пока требует подробного анализа и изучения.

В работе предложена модель формирования геометрического образа деформированного материала припуска при его переходе в стружку при срезании. Проведены контрольные расчеты, выполнена визуализация модели, подтверждающая ее адекватность. Проведенная работа создает предпосылки для моделирования пространственных задач резания инструментов с криволинейными кромками. При этом особую актуальность имеет построение модели стружкообразования на основе уравнений движения пластически деформируемого материала. Результаты работы предполагается использовать при построении комплексной системы моделирования процессов обработки резанием с целью верификации управляющих программ для станков с ЧПУ на этапе технологической подготовки производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Михрютин, В.В. Методология построения комплексной системно-аналитической модели процессов резания / В.В. Михрютин // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева, – Рыбинск: РГАТА. – 2010. – № 1 (16). – С. 39–46.
2. Силин, С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – Москва: Машиностроение, 1979. – 152 с.
3. Altintas, Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design / Y. Altintas. – Cambridge University Press, 2012. – 366 p.
4. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. – 408 с.
5. Клушин, М.И. Резание металлов: Элементы теории пластического деформирования срезаемого слоя / М.И. Клушин. – Москва: Машгиз, 1958. – 453 с.
6. Верещака, А.С. Резание материалов: учебник / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – Москва: Высш. шк., 2009. – 535 с.
7. Воронцов, А.Л. Разработка новой теории резания / А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагичев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 5. – С. 61–69.

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНАХ ФИРМЫ JOHN DEERE

Садыхова М.Ш., доктор философии по техническим наукам

Гянджинский государственный университет, г. Гянджа, Азербайджан

E-mail: sadixovametanet@mail.ru

Анализируются конструктивные особенности, технологические преимущества и возможности применения в сельском хозяйстве современных комбайнов серии John Deere. В исследовании рассматриваются инновационные решения различных серий с точки зрения высокой производительности, минимизации потерь, включая мощные двигательные системы, усовершенствованные механизмы обмолота и сепарации, а также цифровые технологии управления и мониторинга. Также объясняется, как автоматизированные системы настройки, снижая нагрузку на оператора, повышают качество уборки урожая. В заключение обосновывается, что комбайны серии John Deere обеспечивают высокую надежность, маневренность и экономическую эффективность для крупных и средних сельских хозяйств.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, John Deere, ротор с переменным потоком, система очистки, трансмиссия Pro Drive, интерактивная настройка комбайна (ICA), жатка серии 600X, производительность уборки, качество зерна, автоматизация сельскохозяйственной техники

INNOVATIVE SOLUTIONS IN JOHN DEERE GRAIN HARVESTERS

Sadikhova M.Sh., Doctor of Philosophy in Engineering Sciences

Ganja State University, Azerbaijan

E-mail: sadixovametanet@mail.ru

This article analyzes the design features, technological advantages, and potential applications of modern John Deere series combines in agriculture. The study examines innovative solutions across different series in terms of high productivity and loss minimization, including powerful engine systems, advanced threshing and separation mechanisms, as well as digital control and monitoring technologies. The article also explains how automated adjustment systems reduce operator workload while improving harvest quality. In conclusion, it is argued that John Deere series combines provide high reliability, maneuverability, and economic efficiency, making them suitable for medium and large agricultural enterprises.

Keywords: Grain harvester, John Deere, variable-flow rotor, cleaning system, ProDrive transmission, Interactive Combine Adjustment (ICA), 600X header, harvesting performance, grain quality, agricultural machinery automation

Современное сельское хозяйство требует использования высокопроизводительной техники, способной эффективно справляться с уборкой зерновых культур на различных типах почвы и рельефа. Одним из ключевых факторов повышения эффективности уборочного процесса является оптимизация конструкции зерноуборочных комбайнов, направленная на уменьшение потерь зерна, улучшение качества соломы и повышение производительности машины [1].

Внедрение нововведений позволяет оптимизировать процесс уборки в зависимости от типа культуры, влажности зерна, состояния растений и рельефа поля, снижая потери и повышая качество продукции. В данной статье рассматриваются конструктивные особенности, технологические решения и эксплуатационные преимущества современных зерноуборочных комбайнов John Deere серий S, W и T с целью оценки их влияния на эффективность и качество уборочного процесса.

Исследование конструктивных особенностей и эксплуатационных характеристик зерноуборочных комбайнов John Deere серий S, W и T проводилось на основе анализа технической документации производителя и эксплуатационных данных машин в полевых условиях. Основное внимание уделялось следующим аспектам:

1. *Механическая часть комбайна:* изучение устройства ротора с переменным и центробежным потоками, конструкции подающего барабана с восемью пальцами, битеров и шнеков; анализ работы наклонного транспортера с упругими пружинами для компенсации засоров и сил трения; исследование системы очистки зерна, включая двухступенчатые решета, шнек возврата необмолоченного зерна, воздушный поток вентилятора и соломоизмельчающий механизм.

2. *Электронные и автоматизированные системы:* оценка работы цифрового процессора, интерактивной системы настройки комбайна ICA и дисплея на подлокотнике с сенсорной панелью; анализ функционала трансмиссии ProDrive, обеспечивающей адаптивное регулирование мощности двигателя в зависимости от уклона поля и нагрузки на машину; проверка работы системы AutoTrac и программ автоматического управления для повышения точности и производительности уборочного процесса [2].

3. *Эксплуатационные параметры:* измерение производительности комбайна и равномерности подачи массы на роторы и решета; оценка качества соломы и зерна, включая степень их очистки и потери при уборке; проверка функционала новых жаток серии 600X с регулируемым столом, быстротой перенастройки под различные культуры и адаптацией к рельефу почвы.

Начиная с 2014 года в серию S аксиальных зерноуборочных комбайнов John Deere были включены новые модели. По данным производителя эти модели имеют фундаментальные инновации, направленные на повышение производительности. В этих моделях с переменным потоком и сжатием устанавливается новый подающий барабан с восемью пальцами. Благодаря большому количеству отверстий между отдельными рядами подача материала в зону обработки обеспечивается более равномерно.

Изменения в системе очистки предназначены для фермеров, работающих на склонах, и включают: усовершенствованную подачу материала, обеспечивающую равномерную загрузку молотильных органов, в том числе при работе на склонах; улучшенный контроль воздушного потока, способный компенсировать смещение (сползание) уплотненного материала на склонах; двойное основное решето и улучшенную регулировку прохождения материала через решета, что снижает влияние уклонов на поток массы [3].

Новый цифровой процессор и усовершенствованный дисплей позволяют более точно информировать механизатора о потерях зерна и оптимизировать настройки производительности комбайна.

Для всех комбайнов серий W, T и S предусмотрена новая система Interactive Combine Setup (ICA) – интерактивная настройка комбайна, с помощью которой пользователи могут оптимизировать производительность своих машин. Для удобства пользователей дисплей установлен на подлокотнике; по заказу возможен сенсорный экран.

Для минимизации потерь и повышения качества зерна и соломы система предлагает механизатору выбор различных стратегий уборки, а также одной или нескольких целей оптимизации. Оператор может сосредоточиться на качестве зерна, производительности, чистоте зерна или качестве соломы.

Все новые комбайны John Deere, оснащенные трансмиссией Pro Drive, на основе электроники регулируют частоту вращения двигателя в зависимости от текущей нагрузки. При движении на подъем комбайн работает на полной мощности и максимальной скорости. На ровной поверхности или при спуске мощность и скорость двигателя снижаются, что уменьшает расход топлива и обеспечивает значительную экономию. Возможности трансмиссии Pro Drive также облегчают маневрирование комбайна при поворотах. Линейку дополняют новые жатки John Deere серии 600X с регулируемым столом. Эти жатки являются новым этапом развития уборочного оборудования и благодаря новым функциям могут быть перена-

строены под другой вид культуры всего за 8 минут. По словам производителя, нововведения включают интегрированные ножи для уборки рапса, а также возможность настройки жатки под тип убираемой культуры непосредственно с монитора в кабине.

Комбайны серии John Deere разработаны на основе высококачественных современных технологий (рис. 1) [4]. В серии S700 выпускаются модели комбайнов S760, S770, S780, S785 и S790. Независимо от рельефа местности они обеспечивают уборку зерновых на любых участках, сводя потери зерна к минимальному уровню. В зависимости от высоты растений, степени полеглости, уклона местности, влажности зерна и погодных условий на комбайне выполняются соответствующие регулировочные работы.

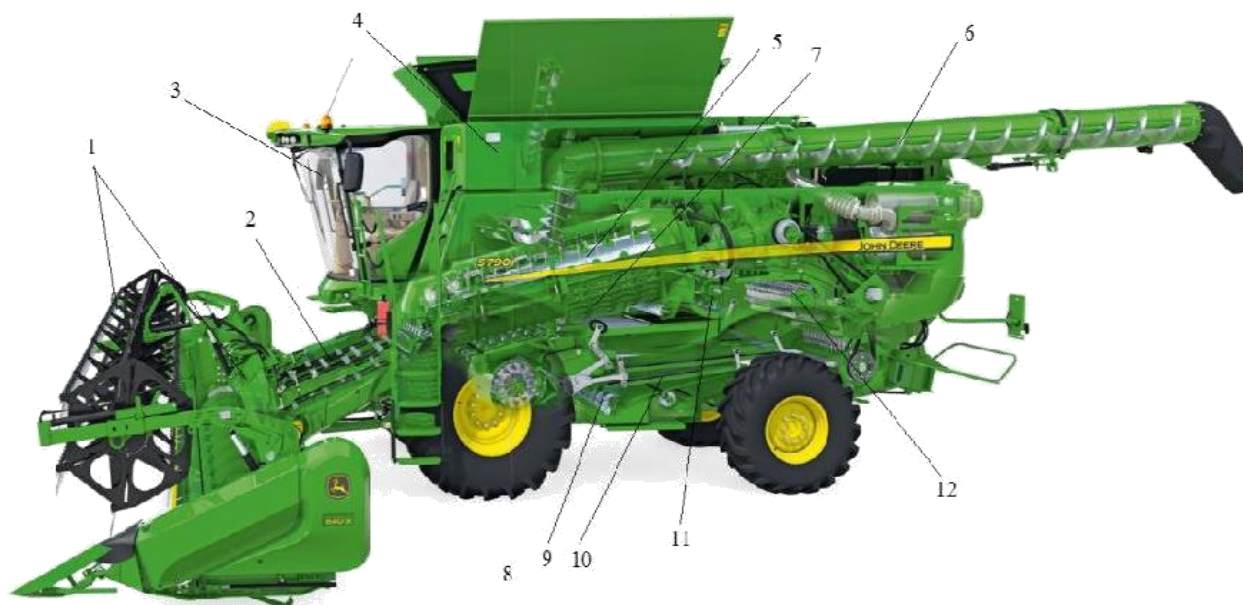


Рис. 1. Конструкция комбайнов John Deere серии S700:

- 1 – жатвенный аппарат, 2 – наклонный транспортер, 3 – кабина, 4 – бункер, 5 – ротор,
- 6 – выгрузной механизм зерна, 7 – подбарабанная дека, 8 – вентилятор,
- 9 – шнек возврата на повторный обмолот, 10 – решета,
- 11 – битей, 12 – измельчающе-разбрасывающий механизм

Данные комбайны настроены по семи программам. Комбайн оснащен функцией автоматического управления AutoTrac, которая обеспечивает высокий уровень комфорта и удобства работы комбайнера [5].

Наклонный транспортер является транспортным механизмом и обеспечивает бесперебойную подачу срезанной массы к очистному механизму. Особенностью данного наклонного транспортера является наличие упругих пружин в направлении его наклона, которые компенсируют воздействие сил, возникающих из-за засоров и попадания посторонних предметов. Одновременно в горизонтальном направлении транспортера также установлены пружины, обеспечивающие его продольную эластичность (движение вперед-назад). Основные механизмы комбайна состоят из следующих элементов: два битера (1) и (4), ротор (2), дека (3), транспортирующий механизм (5), вентилятор, создающий воздушный поток (6), зерновой шнек (7), регулируемые и нерегулируемые верхние и нижние решета (8), а также шнек возврата необмолоченного зерна на повторный обмолот (9) (рис. 2) [6].

В комбайне установлены два битера. Подавая массу к входу и выходу ротора, они регулируют ее движение.

Ротор состоит из четырех частей: головка ротора, корпус ротора, направляющие планки и роторная решетка (клетка). Направление потока массы в роторе бывает двух типов: переменный поток и центробежный поток. Ротор с переменным потоком применяется при уборке риса и целесообразен для культур с высокой влажностью. При центробежном направлении потока ротор втягивает массу и прижимает ее к деке, в результате чего происходит отделе-

ние зерна. Этот режим подходит для культур с влажностью до 18 %. В нижней части ротора установлена дека, а для компенсации возникающих напряжений предусмотрен эластичный соединительный рычаг [7].

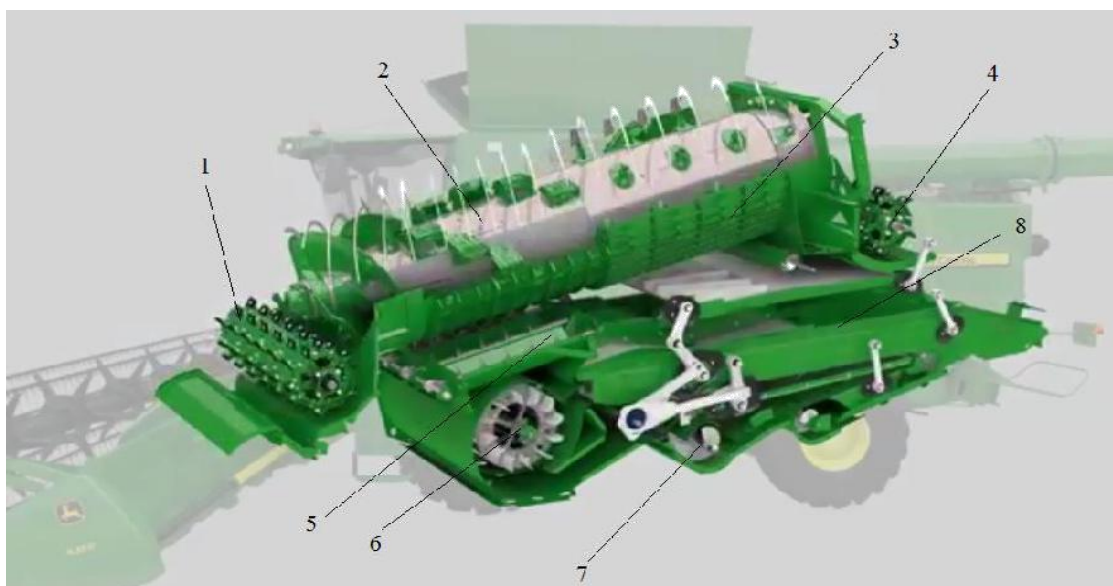


Рис. 2. Общие механизмы:

1, 4 – битер, 2 – ротор, 3 – дека, 5 – транспортирующий шнековый механизм,
6 – вентилятор, 7 – шнек подачи зерна в бункер, 8 – решета

Технологический процесс работы комбайнов John Deere серии S700

Скошенная масса по наклонному транспортеру с помощью битера подается в ротор. В роторе последовательно выполняются три технологические операции.

На первой стадии в головке ротора шнек, вращая массу, обеспечивает ее поступательное движение. На второй стадии бичи обмолачивают массу, отделяя зерно, и передают ее в третью – бильную часть. В бильной части отделяются зерна, прилипшие к массе, после чего масса передается битеру и далее в измельчающе-разбрасывающий механизм, который измельчает ее и равномерно распределяет по полю.

Во время обмолота масса подвергается сжатию и трению. Зерно, находящееся на поверхности массы, отделяется через роторную решетку. Зерна, оставшиеся внутри массы, не проходят через решетку из-за образования липкости при сжатии. Следующую операцию выполняют били ротора, которые отделяют прилипшие зерна от массы и через решетку направляют их в транспортирующий механизм.

Как и во всех комбайнах, в комбайнах John Deere применяется пневматическая очистка с использованием воздушного потока. Воздушный поток проникает в двух направлениях, захватывая легкие частицы смеси, находящейся на верхних и нижних решетках, и направляя их к разбрасывателю. Лопasti вентилятора бывают двух типов – прямые и конические. В зависимости от модели комбайна конструктивные размеры вентилятора различаются [8].

Данный механизм выполняет как измельчение соломы, так и ее разбрасывание. Для обеспечения равномерного распределения соломы по поверхности почвы установлены два разбрасывателя. Рабочий угол разбрасывателей составляет 72 градуса. Соломоизмельчитель измельчает солому и подает ее к разбрасывателю.

В результате проведенного анализа конструктивных и технологических особенностей зерноуборочных комбайнов John Deere серий S, W и T установлено, что внедрение современных механических, электронных и автоматизированных решений существенно повышает эффективность и качество уборки зерновых культур. Использование роторных систем с переменным и центробежным потоками, усовершенствованных систем очистки и подачи массы обеспечивает снижение потерь зерна, улучшение качества соломы и стабильную работу машин в различных почвенно-климатических и рельефных условиях.

Интеграция цифровых систем управления, таких как ICA, AutoTrac и трансмиссия Pro Drive, позволяет оптимизировать рабочие параметры комбайна в режиме реального времени, повышая производительность и снижая расход топлива. Применение современных жаток серии 600X расширяет технологические возможности машин и обеспечивает быструю адаптацию к различным культурам.

Таким образом, комбайны John Deere рассматриваемых серий представляют собой высокотехнологичные уборочные машины, отвечающие требованиям современного сельского хозяйства и обеспечивающие экономически эффективную и качественную уборку зерновых культур. В будущем дальнейшая цифровизация и внедрение сенсорных систем контроля могут еще больше повысить производительность и снизить потери.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по техническому обслуживанию и ремонту комбайнов JohnDeere S-серии TM140859. Техническое руководство по ремонту и обслуживанию комбайнов S760 STS™, S770 STS™, S780 STS™, S785 STS™ и S790 STS™ TM140859 (30JUL18) / Deere&Company. – Moline, Illinois: John Deere Harvester Works, 2018. – 5 с.
2. Садыхова, М.Ш. Совершенствование конструкций почвообрабатывающих орудий / М.Ш. Садыхова // Инновативная роль университетов в развитии экосистем: материалы Республиканской научно-практической конференции, Баку, 5–6 ноября 2024. – Баку: АзТУ, 2024. – С. 15–17.
3. Ахундов, А.Дж. Сельскохозяйственные машины / А.Дж. Ахундов, Т.М. Ибрагимов, Н.Н. Мамедов. – Гянджа, 2006. – 408 с.
4. Исмаилов, И.И. Выполнение работ с использованием сельскохозяйственных машин / И.И. Исмаилов. – Баку, 2017. – 232 с.
5. Курбанов, Х.Н. Современные комбайны для уборки зерновых культур / Х.Н. Курбанов. – Гянджа, 2019. – 170 с.
6. Sadikhova, M.Sh. Technical supply of agricultural machines / M.Sh. Sadikhova // Nature & Science. International Scientific Journal. – 2025. – Vol. 7. – No. 2. – Pp. 18–22.
7. Трубилин, Е.И. Инновационные технологии в сельском хозяйстве: курс лекций / Е.И. Трубилин, А.С. Брусенцов. – Краснодар: КубГАУ, 2019. – 181 с.
8. COMBINE John Deere S – эксплуатация и особенности Combine John Deere S. Документация по эксплуатации и техническим характеристикам серии комбайнов John Deere S: PDF. – agromester.md. – 2025. – PDF-документ, 72 с.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СБОРНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Сальников И.М. [✉], аспирант, Пекарский Е.С., студент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: salnikov.im@samgtu.ru

Представлена инновационная конструкция сборного шлифовального круга, предназначенная для скоростного шлифования металлов и сплавов. Круг состоит из двух дисков, формирующих корпус и удерживающих сменные Т-образные элементы, к которым прикреплены абразивные бруски. Представленная конструкция позволяет повысить коэффициент использования круга за счет малого применения абразивного материала.

Ключевые слова: режущий инструмент, абразивный материал, сборный шлифовальный круг, абразивные бруски, модель, износ круга, коэффициент использования круга

DEVELOPMENT OF A MODULAR GRINDING WHEEL DESIGN

Salnikov I.M. [✉], PhD student; Pekarsky E.S., student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: salnikov.im@samgtu.ru

This article presents an innovative design of a modular grinding wheel intended for high-speed grinding of metals and alloys. The wheel comprises two discs forming the body, which retain replaceable T-shaped elements with attached abrasive blocks. The proposed design enhances versatility through the use of interchangeable elements and increases the wheel utilization coefficient by minimizing abrasive material consumption.

Keywords: cutting tool, abrasive material, modular grinding wheel, abrasive blocks, model, wheel wear, wheel utilization coefficient

В современном машиностроительном производстве постоянно повышаются требования к качеству обработанной поверхности, производительности процесса, стойкости, снижению износа режущего инструмента, а также к энергетическим, силовым и экономическим показателям. Это связано с появлением новых материалов, которые в условиях обработки еще недостаточно изучены.

Основные эксплуатационные характеристики готового изделия (качество поверхности, точность геометрических параметров, усталостная прочность) достигаются при финишной обработке. Наиболее распространенным видом финишной обработки является шлифование [1].

Среди всех видов абразивных материалов, применяемых в шлифовальных инструментах для обработки металлов в условиях производства, наиболее распространенными являются карбид кремния 63С и электрокорунд белый 25А на различных типах связок – в зависимости от марки обрабатываемого материала, вида операции и требуемой шероховатости поверхности. В цельных шлифовальных инструментах преобладает использование указанных абразивных материалов, поскольку технологические процессы их производства являются полностью отработанными, стандартизированными и экономически оптимизированными на всех этапах производства [2].

Экономическая целесообразность производства абразивных инструментов на предприятии достигается при объемах выпуска от 1000 штук и более. Однако в случае несоответствия необходимых характеристик готовой партии предприятие несет убытки, обусловленные необходимостью повторного изготовления продукции и увеличением длительности производственного цикла.

Таким образом, актуальной становится разработка новых сборных конструкций абразивного инструмента, которые позволят увеличить главные показатели, характеризующие процесс операции шлифования.

Разработка сборного шлифовального круга

В производстве наиболее распространенными абразивными инструментами являются шлифовальные круги, соответствующие ГОСТ 52781-2007 «Круги шлифовальные и заточные. Технические условия».

Цельные абразивные круги (рис. 1) по сравнению с сегментными (сборными) имеют следующие недостатки:

- хрупкость (в производстве шлифовальных инструментов самой распространенной связкой является керамическая. Она имеет множество положительных качеств, но главным недостатком данной связки является ее хрупкость. При несоблюдении условия эксплуатации режущий инструмент быстро изнашивается);
- риск разрушения (при неправильной установке и эксплуатации возможен разрыв диска, что в свою очередь сказывается на технологическом процессе);
- ограниченная способность к самозатачиванию (цельные абразивные круги со временем засаливаются, что снижает эффективность шлифования и требует частой правки или замены круга);
- ограниченная универсальность (цельный круг предназначен для обработки определенного типа материала на определенной операции);
- высокий нагрев обрабатываемой поверхности (перегрев заготовки, образование прижогов или изменение структуры обрабатываемого материала).

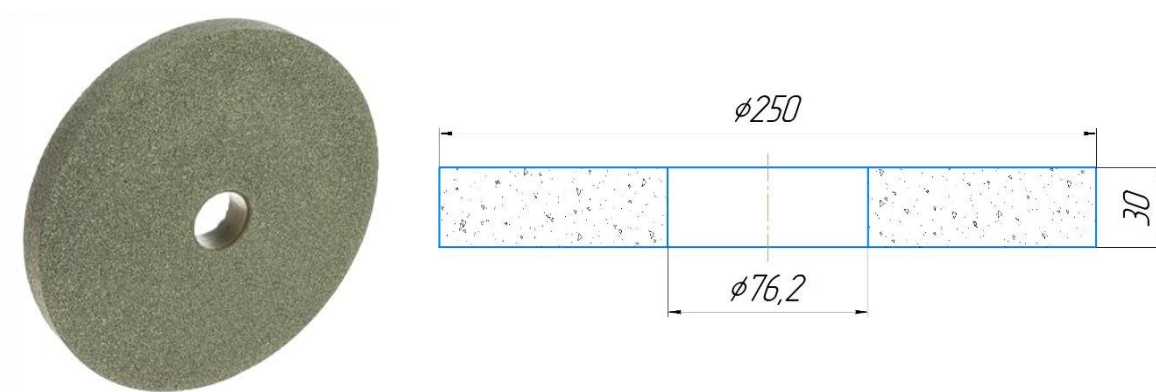


Рис. 1. Шлифовальные круги прямого профиля

Все эти недостатки приводят к снижению коэффициента использования абразивного шлифовального инструмента. В связи с этим была разработана и сконструирована новая конструкция сборного шлифовального круга (рис. 2).

Корпус сборного шлифовального круга состоит из дисков 2 и 3, предназначенных для установки и закрепления сменных Т-образных элементов с абразивным бруском 1 в количестве 10 штук, полностью заполняющих рабочую поверхность круга по его периметру. Фиксация Т-образных элементов в пазах дисков 2 и 3 осуществляется за счет упругого взаимодействия боковых выступов Т-образного профиля со стенками фигурного паза корпуса. Закрепление Т-образных элементов 1 между двумя дисками корпуса осуществляется с помощью винтов с цилиндрической головкой и шестигранным углублением под ключ 4, шайб 5 и гаек шестигранных низких 6.

Сборка шлифовального круга осуществляется следующим образом: диск 2 ставят торцом на поверхность специального приспособления, вставляют в пазы Т-образные элементы с абразивным бруском 1. Сверху устанавливают диск 2. В крепежные отверстия устанавливают болты 4, шайбы 5 и гайки 6 и далее затягивают данный крепеж до нужного натяга. Затем фиксируют круг на шпинделе.

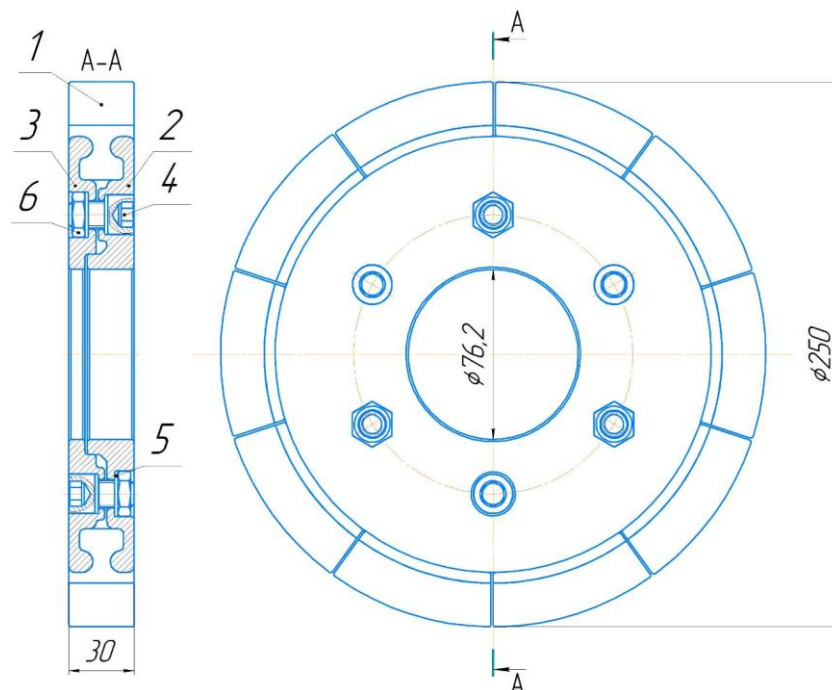


Рис. 2. Сборный шлифовальный круг:

- 1 – Т-образный элемент с абразивным бруском; 2 – диск правый; 3 – диск левый;
4 – винт с цилиндрической головкой; 5 – шайба; 6 – гайка шестигранная

Применение предлагаемого шлифовального сборного круга особенно эффективно в условиях серийного производства, поскольку его конструкция имеет постоянный многоразовый корпус и сменные элементы с рабочими абразивными брусками. При необходимости (в случае разрушения абразивного бруска или смены обрабатываемого материала) сменные элементы с абразивным бруском могут быть заменены на соответствующие с требуемой маркой и зернистостью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Степанов, Ю.С. Технологии, инструменты и методы проектирования абразивной обработки с бегущим контактом: специальность 05.02.08 Технология машиностроения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю.С. Степанов. – Тула, 1997. – С. 42.
2. Основы проектирования и технология изготовления абразивного инструмента: учебное пособие для техникумов по специальности «Производство абразивного и алмазного инструмента» / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глаговский [и др.]; под общ. ред. Ю.М. Ковальчука. – Москва: Машиностроение, 1984. – 228 с.

ОСОБЕННОСТИ ТОЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ МЕТАЛЛ-КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Тагиева С.А., доктор философии по техническим наукам

Гянджинский государственный университет, г. Гянджа, Азербайджан

E-mail: nauchnayastatya80@gmail.com

Рассматриваются особенности наружного точения тонкостенных металл-композитных конструкций с металлополимерным наполнителем. Проанализировано влияние скорости резания, подачи и глубины резания на устойчивость процесса, качество поверхности и геометрическую точность. Установлены рациональные диапазоны режимов точения, обеспечивающие стабильность обработки и сохранность конструктивных свойств металл-композитной системы.

Ключевые слова: металл-композитные конструкции; тонкостенная оболочка; точение; режимы резания; шероховатость поверхности; металлополимерный наполнитель

FEATURES OF TURNING THIN-WALLED METAL-COMPOSITE STRUCTURES WITH A METAL-POLYMER FILLER

Tagieva S.A., Doctor of Philosophy in Engineering Sciences

Ganja State University, Ganja, Azerbaijan

E-mail: nauchnayastatya80@gmail.com

The paper examines the features of external turning of thin-walled metal-composite structures with a metal-polymer filler. The influence of cutting speed, feed rate, and depth of cut on process stability, surface quality, and dimensional accuracy is analyzed. Rational turning regimes ensuring stable machining and preservation of structural integrity of metal-composite systems are determined.

Keywords: metal-composite structures; thin-walled shell; turning; cutting parameters; surface roughness; metal-polymer filler

В современном машиностроении и инструментальном производстве все более широкое применение находят конструкции, ориентированные на интенсивный теплоотвод и повышение эксплуатационной стабильности. К числу таких изделий относятся формообразующие элементы пресс-форм для переработки термопластов, а также корпусной режущий инструмент. В последние годы при их проектировании все чаще используются металл-композитные системы, сочетающие тонкостенную металлическую оболочку с внутренним наполнителем на основе металлополимерных материалов. Применение подобных конструктивных решений позволяет объединить высокую прочность и жесткость металлического каркаса с демпфирующими свойствами и технологической адаптивностью металлополимерного наполнителя [1].

Это способствует снижению массы изделий, повышению виброустойчивости и уменьшению себестоимости при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик. Развитию металл-композитных систем в значительной степени способствует внедрение аддитивных технологий, в частности селективного лазерного сплавления. Данный метод обеспечивает возможность формирования тонкостенных металлических оболочек сложной геометрии с интегрированными внутренними каналами охлаждения. В конструкции пресс-форм такие каналы позволяют целенаправленно отводить тепло из наиболее нагруженных зон формообразующей поверхности, выравнивать температурное поле и сокращать длительность производственного цикла. При точении тонкостенных металл-композитных конструкций тепловая энергия, выделяющаяся в зоне резания, в значительной степени аккумулируется в металлической оболочке и передается к металлополимерному наполнителю. Превышение допустимых температур может привести к локальной деградации полимерной матрицы, снижению адгезии на межфазной гра-

нице и ухудшению геометрической точности обработанных поверхностей. В связи с этим выбор режимов точения для таких конструкций требует особого обоснования. Анализ современных исследований показывает, что большинство существующих рекомендаций по механической обработке относится либо к монолитным металлическим деталям, либо к полимерным композиционным материалам без металлической оболочки. Вопросы токарной обработки тонкостенных металл-композитных систем с металлополимерным наполнителем остаются недостаточно систематизированными, особенно с точки зрения влияния режимов резания на температурное состояние межфазной зоны [2].

В этой связи актуальной является задача количественного анализа процесса точения металл-композитных систем с учетом геометрии оболочки, свойств применяемых материалов и параметров резания. Получение таких данных необходимо для формирования инженерно обоснованных рекомендаций по назначению режимов обработки, обеспечивающих требуемое качество поверхности и сохранность структуры металлополимерного наполнителя. Для исследования особенностей механической обработки металл-композитных конструкций была разработана экспериментальная методика, ориентированная на анализ процесса наружного точения тонкостенной металлической оболочки с внутренним металлополимерным наполнителем. В качестве объекта исследования использовались цилиндрические заготовки, моделирующие конструктивную схему корпусных изделий и элементов пресс-форм, изготовленных с применением аддитивных технологий. Механическая обработка осуществлялась при варьировании основных параметров режима резания в диапазонах, характерных для чистового и получистового точения конструкционных сталей при обработке тонкостенных элементов. Скорость резания изменялась в пределах $V_c = 80\text{--}180$ м/мин, продольная подача $f = 0,05\text{--}0,20$ мм/об, глубина резания – $a_p = 0,2\text{--}0,8$ мм.

Металлическая оболочка заготовок изготавливалась методом селективного лазерного сплавления с последующей термообработкой для стабилизации структуры материала. Толщина стенки оболочки выбиралась с учетом реальных конструктивных параметров корпусных деталей и обеспечивала достаточную жесткость при сохранении тонкостенной геометрии. Внутренние полости оболочки после механической доработки заполнялись металлополимерным композиционным материалом с последующим отверждением, что позволяло сформировать цельную металл-композитную систему. Механическая обработка заготовок осуществлялась на токарном станке универсального типа с числовым программным управлением. В качестве режущего инструмента применялись проходные токарные резцы со сменными твердосплавными пластинами, предназначенные для чистового и получистового точения конструкционных сталей. Геометрия режущей части инструмента подбиралась таким образом, чтобы минимизировать динамические нагрузки и обеспечить стабильное формирование стружки при обработке тонкостенных элементов.

Процесс наружного точения проводился при варьировании скорости резания, подачи и глубины резания. Диапазоны изменения параметров выбирались на основе рекомендаций производителей режущего инструмента и с учетом ограничений, обусловленных конструктивной жесткостью тонкостенной оболочки. Для обеспечения воспроизводимости результатов использовалась схема планированного эксперимента, позволяющая оценить индивидуальное и совместное влияние режимных параметров на характеристики процесса точения. В процессе обработки фиксировались показатели, характеризующие стабильность процесса резания и качество обработанной поверхности. К числу контролируемых параметров относились характер стружкообразования, наличие вибраций, отклонения геометрических размеров и параметры шероховатости поверхности. Оценка шероховатости осуществлялась с применением контактного профилометра по стандартной методике после завершения обработки.

Для исключения влияния внешних факторов заготовки закреплялись в патроне станка с минимальным вылетом, а режимы охлаждения и смазки поддерживались постоянными на протяжении всего эксперимента. Подача смазочно-охлаждающего технологического средства осуществлялась традиционным способом в зону резания, что соответствовало условиям серийной механической обработки корпусных деталей. Предложенная методика исследований

позволяет комплексно оценить особенности механической обработки тонкостенных металл-композитных конструкций и может быть использована при разработке технологических рекомендаций для изготовления корпусных изделий и инструментальных систем с металлополимерным наполнителем.

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены данные, характеризующие особенности процесса наружного точения тонкостенных металл-композитных заготовок при различных сочетаниях режимов резания. Анализ результатов показал, что параметры скорости резания, подачи и глубины резания оказывают комплексное влияние на стабильность процесса обработки, качество формируемой поверхности и точность геометрических размеров изделия. Установлено, что увеличение скорости резания при фиксированных значениях подачи и глубины резания способствует улучшению условий стружкообразования и снижению следов задигов на обработанной поверхности. При этом чрезмерное повышение скорости приводит к снижению устойчивости процесса точения, что проявляется в появлении вибраций и ухудшении параметров шероховатости [3].

Изменение продольной подачи оказывает существенное влияние на формирование микрорельефа поверхности. При малых значениях подачи наблюдается стабильное резание с получением равномерной текстуры поверхности, характерной для чистовой обработки. Увеличение подачи приводит к росту высоты неровностей профиля и появлению характерных следов периодичности, что ограничивает применение высоких значений подачи при обработке деталей, к которым предъявляются повышенные требования по качеству поверхности. Глубина резания в наибольшей степени определяет механическую нагруженность тонкостенной оболочки в процессе точения. При увеличении глубины резания возрастает вероятность упругих прогибов заготовки, что приводит к отклонениям от заданных размеров и нестабильности геометрической формы. В условиях металл-композитной конструкции влияние глубины резания проявляется более выражено по сравнению с однородными металлическими заготовками, что обусловлено неоднородностью механических свойств системы «металлическая оболочка – металлополимерный наполнитель». Наилучшие результаты по совокупности показателей качества поверхности и устойчивости процесса достигаются при использовании умеренных значений скорости резания и подачи в сочетании с ограниченной глубиной резания. Такие режимы обеспечивают стабильное стружкообразование, минимизацию вибраций и сохранение заданной геометрии тонкостенной оболочки [4].

Наличие металлополимерного наполнителя оказывает стабилизирующее влияние на процесс обработки за счет повышения общей жесткости конструкции. Это позволяет расширить допустимый диапазон режимов резания по сравнению с пустотелыми тонкостенными заготовками, однако полностью не устраняет чувствительность процесса к превышению рациональных значений подачи и глубины резания. На основании полученных экспериментальных данных были построены эмпирические зависимости, отражающие влияние параметров режима резания на показатели качества обработки. Анализ данных зависимостей позволяет определить области рациональных режимов точения, обеспечивающих получение поверхности с заданными характеристиками шероховатости при сохранении размерной точности детали. При механической обработке металл-композитных тонкостенных конструкций решающее значение имеет согласованный выбор режимов резания с учетом конструктивных особенностей заготовки (см. таблицу). Применение рекомендованных диапазонов параметров позволяет обеспечить устойчивый процесс точения и повысить технологическую надежность изготовления изделий сложной геометрии [5, 6].

Режимы точения металл-композитных заготовок

№ опыта	V_c , м/мин	f , мм/об	a_p , мм
1	80	0,05	0,2
2	120	0,10	0,4
3	150	0,15	0,6
4	180	0,20	0,8

Анализ термонагруженности процесса точения показал, что повышение скорости резания и глубины резания сопровождается ростом тепловой нагрузки на металлическую оболочку. В условиях пониженной теплопроводности межфазной зоны «металл – металлополимер» это приводит к локальному накоплению тепла в приповерхностных слоях оболочки. Наблюдаемые изменения характера стружкообразования и стабильности процесса косвенно подтверждают влияние температурного фактора, особенно при обработке заготовок с минимальной толщиной стенки [7]. Оценка шероховатости поверхности показала, что минимальные значения параметров микрорельефа достигаются при малых и умеренных значениях подачи. При увеличении подачи наблюдается закономерный рост высоты неровностей профиля, что соответствует общим закономерностям процесса точения и ограничивает применение высоких подач при чистовой обработке металл-композитных конструкций.

Таким образом, наличие внутреннего заполнителя существенно изменяет условия резания по сравнению с обработкой однородных металлических заготовок и требует учета конструктивной неоднородности системы «металлическая оболочка – металлополимерный заполнитель». Основные параметры режима резания – скорость резания, продольная подача и глубина резания – оказывают комплексное влияние на устойчивость процесса, качество формируемой поверхности и точность геометрических размеров. Установлено, что увеличение скорости резания при рациональных значениях подачи и глубины резания способствует улучшению условий резания, однако превышение допустимых значений приводит к снижению стабильности обработки и появлению вибраций, особенно при минимальной толщине металлической оболочки. Продольная подача в наибольшей степени определяет параметры шероховатости поверхности, тогда как глубина резания оказывает решающее влияние на жесткостные характеристики тонкостенной конструкции и точность обработки. Наличие металлополимерного заполнителя повышает общую жесткость заготовки и частично компенсирует упругие деформации, однако не исключает необходимости ограничения режимов резания при чистовой обработке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование термонагруженности процесса точения металл-композитной системы в зависимости от скорости, подачи и глубины резания при обработке тонкостенной металлической оболочки толщиной 2 мм / Н.С. Любимый, Б.С. Четвериков, С.В. Ключев [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 131–147. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-131-147. – EDN UQQYSS.
2. Грановский, Г.И. Резание металлов: учеб. пособие для вузов / Г.И. Грановский. – Москва: Машиностроение, 1985. – 304 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А.М. Дальского. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 2003. – Т. 1. – 912 с.
4. Коваленко, В.С. Технология механической обработки тонкостенных деталей / В.С. Коваленко, И.И. Мазур. – Москва: Машиностроение, 1990. – 256 с.
5. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1975. – 344 с.
6. Shaw, M.C. Metal Cutting Principles / M.C. Shaw. – 2nd ed. – Oxford: Oxford University Press, 2005. – 651 p.
7. Davim, J.P. Machining of Metal Matrix Composites / J.P. Davim. – London: Springer, 2012. – 232 p.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЗАДНЕЙ БАБКИ ТОКАРНОГО СТАНКА

Якимов М.В. , к.т.н., доцент, **Лопатин Е.В.**, аспирант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: mikya@yandex.ru

Рассматривается модернизация конструкции задней бабки токарного станка по критерию жесткости. Выполнен сравнительный конечно-элементный анализ базовой (составной) и предлагаемой (моноконтинуальной) конструкций в среде ANSYS Workbench при трех вариантах нагружения: воздействие массы заготовки максимальных размеров, силы резания при точении и при сверлении. Ключевым оценочным параметром выступали перемещения оси отверстия под пиноль, определенные через виртуальные точки в пяти сечениях. Результаты моделирования показали, что модернизированная конструкция, обладающая меньшей массой и повышенной технологичностью изготовления, обеспечивает лучшие показатели жесткости: максимальные суммарные перемещения при точении снижены на 20 %, вертикальные перемещения при сверлении – на 8 %, а перемещения от веса заготовки – на 22 %. Сделан вывод о целесообразности внедрения предложенной конструкции как удовлетворяющей эксплуатационным требованиям и улучшающей экономические показатели производства.

Ключевые слова: задняя бабка, токарный станок, модернизация, жесткость, конечно-элементный анализ, ANSYS Workbench, сила резания, перемещение

OPTIMIZATION OF A LATHE TAILSTOCK DESIGN

Yakimov M.V. , PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Lopatin E.V.**, PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: mikya@yandex.ru

The article substantiates the modernization of the tailstock design of a lathe based on the stiffness criterion. A comparative finite element analysis of the basic (composite) and proposed (monolithic) designs was performed in the ANSYS Workbench environment under three loading conditions: the impact of the workpiece mass of maximum dimensions, cutting forces during turning, and cutting forces during drilling. The key evaluation parameter was the displacement of the quill hole axis, determined through virtual points in five cross-sections. The simulation results showed that the modernized design, which has a lower mass and increased manufacturing manufacturability, provides better stiffness indicators: maximum total displacements during turning are reduced by 20 %, vertical displacements during drilling by 8 %, and displacements from the workpiece weight by 22 %. The conclusion is made about the feasibility of implementing the proposed design, as it meets operational requirements and improves the economic indicators of machine tool production.

Keywords: tailstock, lathe, modernization, stiffness, finite element analysis, ANSYS Workbench, cutting force, displacement

Требования к конструкции базовых деталей металлорежущих станков обусловлены теми функциями, которые они выполняют при эксплуатации. Поскольку задняя бабка – это один из основных конструктивных элементов станка, который воспринимает массу заготовки и силы резания, на первый план выдвигаются требования по ее прочности и жесткости.

Целью работы является обоснование модернизации конструкции задней бабки токарного станка по критерию жесткости для случаев учета веса заготовки, выполнения технологической операции точения и сверления в сравнении модернизированной бабки с базовой задней бабкой.

Принципиальным отличием конструкций рассматриваемых задних бабок является то, что корпус модернизированной бабки является единым, в то время как базовая бабка состоит из основания и непосредственно корпуса. Конструкция базовой бабки позволяет смещать

положение оси пиноли в горизонтальной плоскости, что в текущих реалиях используется очень редко. В свою очередь такая конструкция нетехнологична и требует существенных затрат при производстве (рис. 1, а).

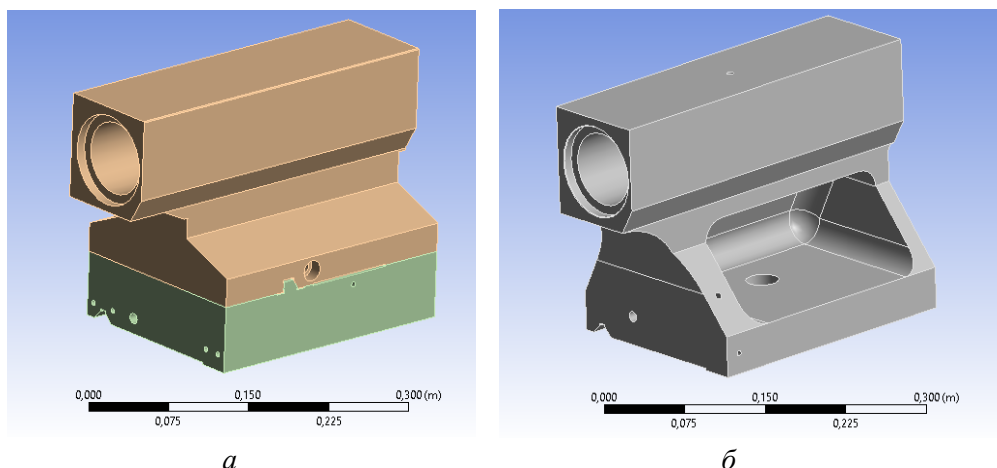


Рис. 1. 3D-модель корпуса задней бабки токарного станка модели SAMAT – 400А:
а – базовая; б – модернизированная

Предлагаемая модернизированная конструкция помимо монолитности обладает меньшим весом (ориентировочно на 15 %) и более функциональным механизмом зажима бабки на направляющих станины (рис. 1, б).

Оценка рациональности предлагаемой конструкции задней бабки осуществлялась путем конечно-элементного моделирования в среде ANSYS Workbench. В качестве основного критерия выступали перемещения оси отверстия под пиноль. При этом рассматривались три варианта нагружения: 1) воздействие веса стальной заготовки максимальных размеров при обработке над суппортом; 2) выполнение операции точения проходным резцом с пластиной из твердого сплава марки T15K6 заготовки $\varnothing 100$ мм из Стали 45 с режимами: $V = 94,2$ м/мин, $t = 1,2$ мм, $S = 0,25$ мм/об; 3) выполнение операции сверления заготовки из Стали 45 сверлом из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 32 мм со скоростью резания $V = 30$ м/мин и подачей (ориентировочно) $S = 0,2$ мм/об.

При разработке конечно-элементной модели базовой задней бабки учитывались контактные взаимодействия между корпусом и основанием. Использовался тип контакта «без разделения».

Конечно-элементные модели базовой и модернизированной бабок представлены на рис. 2.

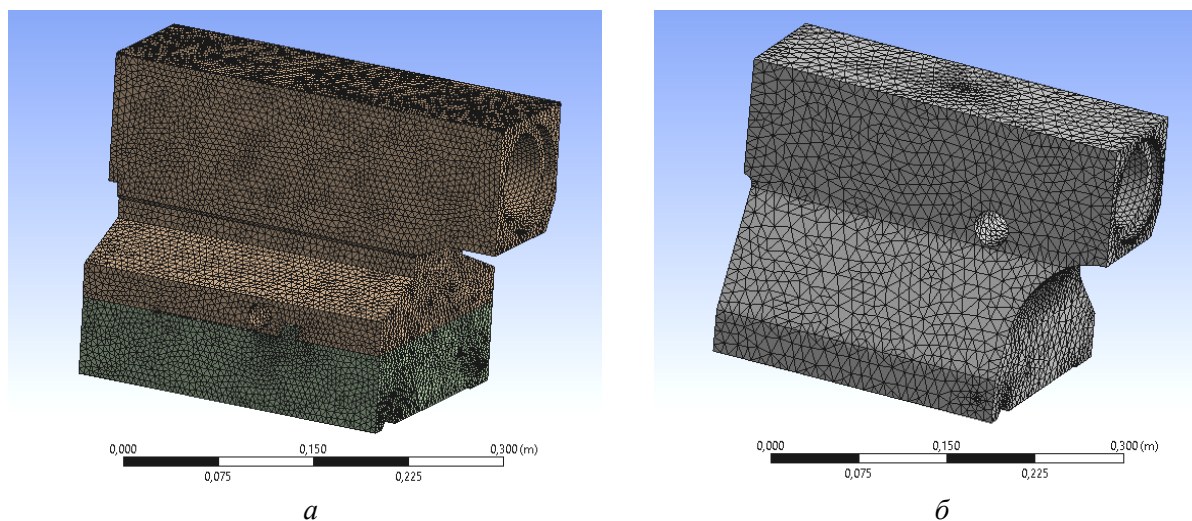


Рис. 2. Конечно-элементные модели корпуса задней бабки токарного станка модели SAMAT – 400А:
а – базовая; б – модернизированная

Учет веса заготовки, а также силы резания реализовывался путем применения «удаленной нагрузки», приложенной в случае оценки влияния веса и точении – к поверхности отверстия под пиноль, при моделировании сверления – к заднему торцу корпуса бабки в месте крепления фланца.

Для оценки картины деформаций отверстия под пиноль корпусов бабок были созданы виртуальные точки, привязанные к пяти сечениям отверстия, с расстоянием между ними 84 мм (рис. 3).

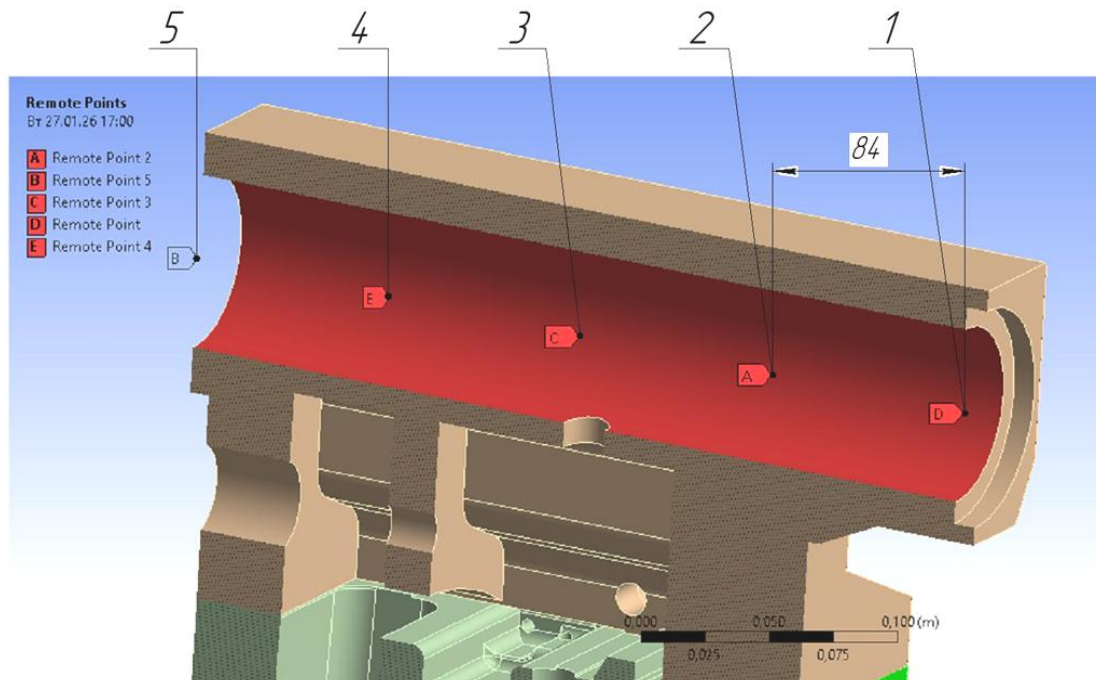


Рис. 3. Расположение «удаленных точек» вдоль оси отверстия под пиноль

В качестве результатов рассматривались перемещения указанных точек по направлениям, а также их суммарные перемещения. На рис. 4 и 5 представлены графики, отражающие закономерности изменения указанных выше параметров.

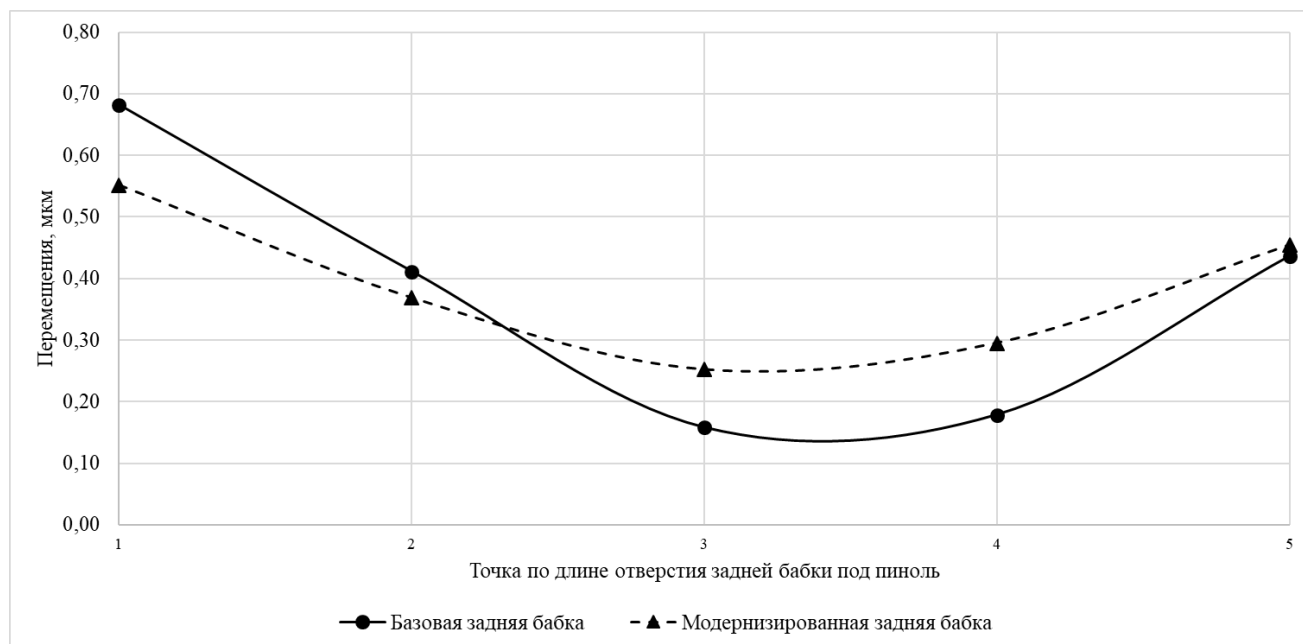


Рис. 4. Графики суммарных перемещений виртуальных точек моделей задней бабки при точении

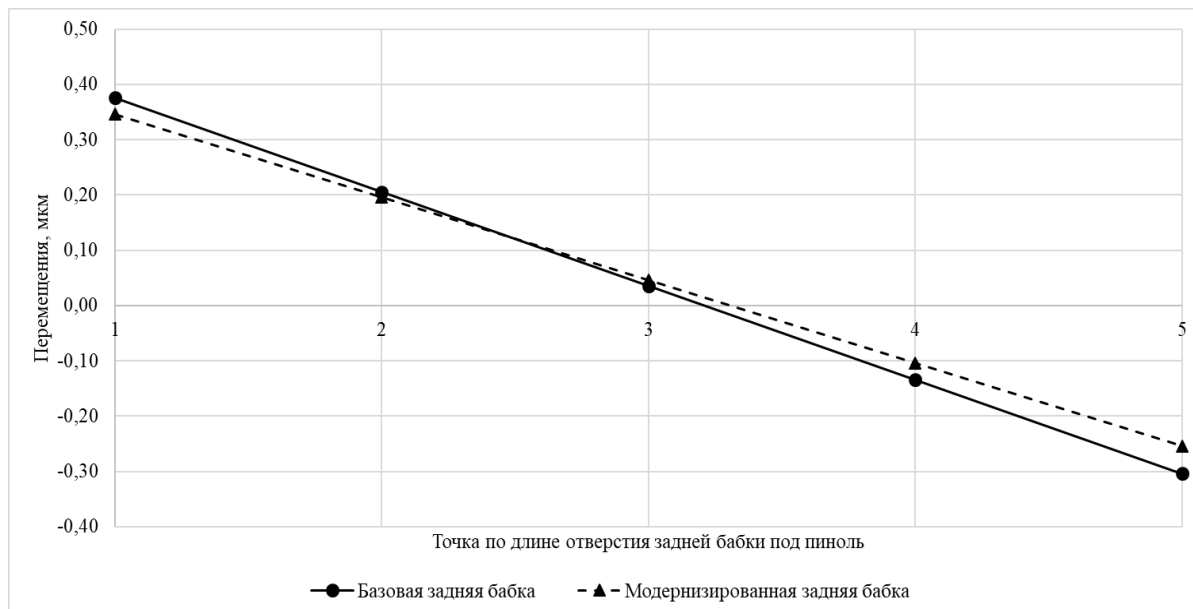


Рис. 5. Графики перемещений в вертикальной плоскости виртуальных точек моделей задней бабки при сверлении

Анализ результатов показал, что по рассматриваемым показателям модернизированная задняя бабка обладает лучшими характеристиками: например, при моделировании обработки точением максимальные суммарные перемещения ниже на 20 %, максимальные перемещения в вертикальной плоскости при сверлении меньше на 8 %, при учете воздействия веса заготовки максимальных размеров – меньше на 22 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная конструкция задней бабки токарного станка удовлетворяет критерию жесткости и может быть внедрена в производство, поскольку является более технологичной как с точки зрения механической обработки, так и литейной заготовки, что положительно сказывается на экономических показателях производства станка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Каминская, В.В. Станины и корпусные детали металлорежущих станков (расчет и конструирование) / В.В. Каминская, З.М. Левина, Д.Н. Решетов. – Москва: Машгиз, 1960. – 363 с.
2. Детали и механизмы металлорежущих станков / Под ред. Д.Н. Решетова. – Т. 1. – Москва: Машиностроение. 1972. – 664 с.
3. Якимов, М.В. Оптимизация конструкции станины токарно-винторезного станка по критериям жесткости, виброустойчивости и технологичности / М.В. Якимов, А.Ф. Денисенко, Е.В. Лопатин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 3 (2). – С. 269–277.

Секция 2. ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

УДК 621.9.047

ВЛИЯНИЕ МАРКИ СВЕРХТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ

Борисов М.А. , доцент, к.т.н., доцент, **Надеждина О.А.**, старший преподаватель

*Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Российская Федерация
E-mail: borisovmgou@mail.ru*

Известно, что при электрохимическом шлифовании токопроводящих деталей инструментом из сверхтвердых материалов на шероховатость их поверхности оказывают влияние режимы резания и условия, в которых происходит обработка. При этом могут применяться шлифовальные инструменты, изготовленные из таких марок сверхтвердых материалов, как алмаз и эльбор. Был проведен полный факторный эксперимент и в результате его обработки получены два линейных уравнения регрессии. Одно уравнение справедливо при использовании эльборовых головок, второе – при использовании алмазных головок. Уравнения позволяют оценить ожидаемые значения шероховатости поверхности образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, подвергаемых электрохимическому шлифованию.

Ключевые слова: электрохимическое шлифование, алмазные и эльборовые головки, шероховатость поверхности, нержавеющая сталь, уравнение регрессии

INFLUENCE OF SUPERHARD MATERIAL GRADE ON THE ROUGHNESS OF THE TREATED SURFACE OF STAINLESS STEEL UNDER ELECTROCHEMICAL GRINDING CONDITIONS

Borisov M.A. , Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Nadezhkina O.A.**, senior lecturer

*Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation
E-mail: borisovmgou@mail.ru*

It is known that during electrochemical grinding of conductive parts with tools made of superhard materials, the roughness of their surface is affected by the cutting modes and conditions under which the processing takes place. Grinding tools made of superhard materials such as diamond and CBN can be used. A full factorial experiment was conducted, and its processing yielded two linear regression equations. One equation is valid when using CBN grinding heads, the other when using diamond grinding heads. These equations allow one to estimate the expected surface roughness values of 12X18N10T stainless steel samples subjected to electrochemical grinding.

Keywords: electrochemical grinding, diamond and CBN heads, surface roughness, stainless steel, regression equation

Известно, что при электрохимическом шлифовании токопроводящих деталей инструментом из сверхтвердых материалов на шероховатость их поверхности оказывают влияние режимы резания и условия, в которых происходит обработка [1–4]. К таким условиям относятся также плотность тока травления детали и свойства применяемого электролита – его температура и концентрация различных веществ в водном растворе [5–7]. При этом могут применяться шлифовальные инструменты, изготовленные из таких марок сверхтвердых материалов, как алмаз и эльбор [8, 9].

Влияние указанных марок на шероховатость обрабатываемых поверхностей деталей из нержавеющей стали в совокупности с другими параметрами процесса электрохимического шлифования изучено недостаточно. Целью данной работы является определение влияния марки сверхтвердого материала, применяемого в шлифовальных головках, на шероховатость обработанной поверхности нержавеющей стали в условиях электрохимического шлифования.

При постановке полного факторного эксперимента для проведения сравнительного анализа использовались последовательно эльборовые головки AW 6×10×3×60 ЛКВ50 125/100 100 % МЭ-3 и головки алмазные AW 6×10×3×60 AC20 125/100 100 % МЭ. Проводилось электрохимическое шлифование торцевой поверхности образцов диаметром 10 мм из нержавеющей стали 12X18H10T на специальном исследовательском стенде [10, 11].

Были установлены следующие режимы обработки: глубина резания $t = 0,05$ мм, подача $S = 240$ мм/мин, скорость резания $V = 10$ м/с. Плотность тока травления образца изменялась от $i_{et} = 0,1$ А/мм² до $i_{et} = 0,3$ А/мм². Электролит состоял из воды и хлорида натрия NaCl. Концентрация хлорида натрия в электролите изменялась от $c = 0,9$ % до $c = 20$ %. Температура электролита T варьировалась в пределах от 20 до 50 °С. В таблице представлены переменные факторы, используемые при проведении полного факторного эксперимента.

Переменные факторы, используемые при проведении полного факторного эксперимента

Наименование фактора	Обозначение фактора в натуральной форме	Обозначение коэффициентов уравнения регрессии
Температура электролита, °С	T	b_1
Плотность тока травления образца, А/мм ²	i_{et}	b_2
Концентрация NaCl в водном растворе электролита, %	c	b_3

Полученная в результате шлифования шероховатость обработанной поверхности измерялась с использованием профилометра модели 130. После обработки результатов экспериментов были получены два линейных уравнения регрессии, справедливые в указанных пределах варьирования переменных данных.

При использовании эльборовых головок AW 6×10×3×60 ЛКВ50 125/100 100 % МЭ-3 уравнение регрессии принимает следующий вид:

$$Ra = 2,202 - 0,011 \cdot T - 1,275 \cdot i_{et} + 0,006 \cdot c. \quad (1)$$

При использовании алмазных головок AW 6×10×3×60 AC20 125/100 100 % МЭ уравнение регрессии запишется в виде

$$Ra = 2,081 - 0,018 \cdot T - 1,713 \cdot i_{et} + 0,016 \cdot c. \quad (2)$$

Проанализировав и сравнив полученные уравнения регрессии, можно утверждать следующее:

1. Шероховатость обработанной электрохимическим шлифованием головками из сверхтвердых материалов (эльбора и алмаза) поверхности образцов из стали 12X18H10T снижается при повышении температуры водного раствора хлорида натрия от 20 до 50 °С, увеличении плотности тока травления от $i_{et} = 0,1$ А/мм² до $i_{et} = 0,3$ А/мм² и повышается при увеличении концентрации NaCl в водном растворе электролита до 20 %.

2. Использование в шлифовальных головках эльбора или алмаза не приводит к значительному изменению значения шероховатости при электрохимическом шлифовании нержавеющей стали 12X18H10T. Однако значения шероховатости обработанной поверхности меньше при использовании алмазных головок, чем при использовании эльборовых головок.

Для определения вклада независимых переменных – температуры электролита, плотности тока травления образцов и концентрации NaCl в водном растворе электролита на изменение шероховатости поверхности обработанных образцов был проведен анализ рассчитанных коэффициентов регрессионных моделей в безразмерной форме.

При использовании эльборовых головок:
AW 6×10×3×60 ЛКВ50 125/100 100 % МЭ-3
коэффициенты регрессионной модели:
 $b_0 = 1,6163$,
 $b_1 = -0,1663$,
 $b_2 = -0,1262$ и $b_3 = 0,05838$.

При использовании алмазных головок:
AW 6×10×3×60 AC20 125/100 100 % МЭ
коэффициенты регрессионной модели:
 $b_0 = 1,2862$,
 $b_1 = -0,2638$,
 $b_2 = 0,1713$ и $b_3 = 0,1488$.

Наибольшее влияние на изменение шероховатости обработанной поверхности образцов из стали 12X18H10T эльборовыми и алмазными головками в условиях электрохимического шлифования оказывают температура электролита и плотность тока травления образца. При использовании эльборовых головок концентрация NaCl в водном растворе электролита меньше влияет на фактическое значение шероховатости, чем при шлифовании алмазными головками.

При проведении исследований и обработке их результатов получены уравнения регрессии, которые можно использовать для предварительной оценки ожидаемых значений шероховатости поверхности образцов из нержавеющей стали 12X18H10T, подвергаемых шлифованию головками из сверхтвердых материалов в условиях электрохимического шлифования, и оценить влияние переменных факторов на ее величину.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ways to implement hybrid finishing technology with a hand-held rotary tool / D. Lobanov, M. Borisov, A. Yanyushkin, V. Skeebe // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 709, 4, Issue 3. – Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 044075. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044075. – EDN FPZGAE.
2. Янюшкин, А.С. Исследование влияния электрических режимов комбинированной электроалмазной обработки на качество шлифования твердых сплавов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции. Юргинский технологический институт. – Томск, 2014. – С. 323–327.
3. Надеждина, О.А. Влияние параметров процесса шлифования нержавеющей стали на шероховатость / О.А. Надеждина, М.А. Борисов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2025. – Т. 12, № 3–4. – С. 7–13.
4. Борисов, М.А. Влияние продолжительности импульсов тока на интенсивность электрохимического шлифования / М.А. Борисов, В.А. Мишин // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2019. – Т. 6, № 1–4. – С. 48–52.
5. Борисов, М.А. Зависимость шероховатости поверхности от плотности тока, температуры и концентрации электролита при электрохимическом шлифовании стали 12X18H10T / М.А. Борисов, О.А. Надеждина, А.С. Зворыгин // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 09–11 апреля 2025 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2025. – С. 6–9. – EDN KLFHNNK.
6. Борисов, М.А. Влияние режимов резания на шероховатость поверхности при электрохимическом шлифовании коррозионностойкой стали 12X18H10T / М.А. Борисов, В.В. Николаев // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2021. – Т. 8, № 3–4. – С. 19–24. – EDN USFTZH.
7. Борисов, М.А. Влияние температуры и концентрации электролита на шероховатость при электрохимическом шлифовании коррозионностойкой стали 12X18H10T / М.А. Борисов, А.С. Зворыгин // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2022. – Т. 9, № 1–2. – С. 15–22. – EDN DGLOIP.

8. Применение металлоорганической связки при шлифовании кругами с зернами из сверхтвердых материалов / П.М. Салов, Д.П. Салова, С.С. Сайкин [и др.]; ответственный редактор Н.И. Веткасов // Инновационные технологии в металлообработке: сборник научных трудов, Ульяновск, 12 ноября 2016 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. – С. 114–118. – EDN XYNKDN.
9. Носенко, В.А. Технология шлифования металлов / В.А. Носенко, С.В. Носенко. – 2-е изд., стер. – Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2019. – 616 с.
10. Разработка устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, В.Ю. Скиба, О.А. Надеждина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 93–105. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-93-105. – EDN TOQSUS.
11. Зворыгин, А.С. Стенд для исследования процесса электрохимического шлифования / А.С. Зворыгин, М.А. Борисов, О.С. Рафанова // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых, Севастополь, 19–22 мая 2020 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2020. – С. 64–69. – EDN CVBYXG.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ГЕЙМИФИКАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ВВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Дында Е.П. , студент, Пустовых О.С., старший преподаватель

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Российская Федерация
E-mail: epd6@tpu.ru

Представлена методика геймификации курса «Введение в машиностроительные технологии» с использованием искусственного интеллекта. Рассмотрена адаптация игры «Имаджинариум», где ключевую роль выполняет генерация ИИ метафорических иллюстраций инженерных понятий. Отмечена эффективность данного подхода для вовлечения студентов, визуализации абстрактных тем и формирования профессиональной среды на ранних этапах обучения.

Ключевые слова: геймификация, искусственный интеллект (ИИ), машиностроительные технологии, ассоциативная игра, визуализация, инженерное образование

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE GAMIFICATION OF THE DISCIPLINE “INTRODUCTION TO ENGINEERING TECHNOLOGIES”

Dynda E.P. , student, Pustovykh O.S., senior lecturer

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
E-mail: epd6@tpu.ru

The method of gamification of the course “Introduction to mechanical engineering technologies” using artificial intelligence is presented. The adaptation of the Imaginarium game is considered, where the key role is played by the generation of AI metaphorical illustrations of engineering concepts. The effectiveness of this approach for involving students, visualizing abstract topics and forming a professional environment at the early stages of learning is noted.

Keywords: gamification, artificial intelligence (AI), engineering technologies, associative game, visualization, engineering education

«Введение в машиностроение» – это фундаментальный курс, формирующий у студентов базовое инженерное мировоззрение. Его цель – познакомить с основными понятиями, принципами конструирования, технологиями производства, стандартами и особенностями работы машиностроительного предприятия.

Данный курс закладывает основу для понимания смысла изучения всех дальнейших дисциплин специальности и раскрывает суть будущей профессии, но так как дисциплина изучается, как правило, в первом семестре, студентам сложно вникнуть в суть и трезво оценить важность получаемой информации.

Чтобы преодолеть этот барьер, необходим «мягкий» и вовлекающий формат, который снизит стресс, сделает абстрактные понятия осязаемыми и поможет студентам в неформальной обстановке освоиться в новой профессиональной среде, а также наладить коммуникацию в группе и с преподавателем, что способно оказать исключительно положительное воздействие на дальнейшее обучение.

Таким мостом может стать адаптация социальной дедуктивной игры «Имаджинариум», где механика ассоциаций и интерпретации образов идеально ложится на задачу изучения и визуализации инженерных понятий. Применение искусственного интеллекта позволяет трансформировать эту настольную игру в персонализированный и динамичный формат для занятий, посвященных машиностроению.

Игрок (студент/преподаватель) становится ведущим. Он выбирает скрытую от других карту из своей руки и формулирует к ней ассоциацию, при этом правила предусматривают усложнения, благодаря которым ведущий должен придумать ассоциацию, используя правила или понятия из физики, механики и т. д. Остальные игроки выбирают из своих рук карту, наиболее подходящую к этой ассоциации. Все карты перемешиваются и выкладываются. Задача – угадать исходную карту ведущего.

Генерация неочевидных, атмосферных карт – это ключевая роль ИИ. Карты не должны быть прямыми фотографиями деталей. Специальная программа на основе искусственного интеллекта создает изображения, которые передают ощущение, ассоциацию, настроение, связанное с понятием или процессом:

Тема: «Турбина».

Прямая иллюстрация: обычный чертеж с изометрическим изображением турбины или фото изделия.

Атмосферная иллюстрация от ИИ: фото улитки на фоне леса, но вместо панциря у нее та самая турбина. Изображение показывает форму изделия, а также метафорично отображает его суть (рис. 1).

Тема: «Измерительные приборы».

Прямая иллюстрация: изображение стандартных приборов для измерения: линейка, штангенциркуль, треугольник, циркуль и т. п.

Атмосферная иллюстрация от ИИ: те же самые стандартные приборы, но идущие по подиуму в дизайнерской одежде, как на неделе моды (рис. 2).



Рис. 1. Атмосферная иллюстрация от ИИ



Рис. 2. Атмосферная иллюстрация от ИИ

Тема: «Станки».

Атмосферная иллюстрация от ИИ: пульт управления станка с ЧПУ, но вместо стандартных кнопок – кнопки с изображенными на них детскими рисунками. Или дымящийся токарный станок с разлетающейся стружкой, расположенный в развороте книги на фоне библиотечной полки (рис. 3).

Тема: «Будущая работа».

Прямая иллюстрация: фото производственных цехов, лабораторий или производственных чертежей, которые не выглядят привлекательными и интересными.

Атмосферная иллюстрация от ИИ: красивые атмосферные картинки, отражающие масштабность работы на заводе, эстетику этого места или забавные картинки с выдуманных совещаний в стиле мультлика (рис. 4, 5).

Атмосферная иллюстрация от ИИ: инженер, как врач, рассматривает рентген-снимок механизма, как бы излечивая его от проблем и разбираясь в причине болезни (поломки) (рис. 6).



Рис. 3. Атмосферная иллюстрация от ИИ



Рис. 4. Иллюстрация от ИИ



Рис. 5. Иллюстрация от ИИ



Рис. 6. Иллюстрация от ИИ

Тема: «Обучение».

Атмосферная иллюстрация от ИИ: изображение, которое преподносит изучение важных и сложных дисциплин с точки зрения юмора, что помогает студентам проще относиться к трудностям в процессе обучения, но не умаляет важности предмета.

Например, инженер настолько долго сидит над чертежом, что под потолком уже образовалась паутина, а вокруг стола горы катышков от ластика, однако, несмотря на испорченное настроение, мужчина продолжает работать (рис. 7).



Рис. 7. Атмосферная иллюстрация от ИИ

В данном контексте ИИ выступает как «визуальный сценарист», «атмосферный дизайнер» и «генератор вдохновения». Его задача – создать целостную, стилистически выверенную и эмоционально заряженную визуальную вселенную курса, которая сделает процесс обучения эстетически приятным и мотивирующим. Игровой, почти шуточный формат позволяет безбоязненно пробовать, ошибаться и учиться на ассоциациях других. Студент, который стесняется задать вопрос на лекции, в игре активно участвует.

Предложенный подход демонстрирует прекрасную возможность интеграции искусственного интеллекта в изучение базовой для студентов-машиностроителей дисциплины. Адаптация механики ассоциативной игры раскрепощает, снижает стресс и способствует формированию профессионального сообщества на раннем этапе.

Таким образом, данная методика служит действенным инструментом для преодоления познавательного барьера у первокурсников, закладывая прочный и мотивирующий фундамент для их дальнейшего инженерного образования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ИИ и геймификация в обучении: опыт СберУниверситета. Новости СберУниверситета [Электронный ресурс]. – URL: <https://sberuniversity.ru/news/II-i-geymifikatsiya-v-obuchenii-opyt-SberUniversiteta/> (дата обращения: 17.12.2025). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
2. РБК Тренды. Геймификация: как игровой подход помогает в обучении и на работе [Электронный ресурс]. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/education/605c6f2f9a79473a61646994> (дата обращения: 17.12.2025). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
3. КиберЛенинка. Геймификация и ИИ: новые подходы к вовлечению студентов в образовательный процесс [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geymifikatsiya-i-ii-novye-podhody-k-vovlecheniyu-studentov-v-obrazovatelnyy-protsess/viewer> (дата обращения: 17.12.2025). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Зоткин И.А., аспирант

МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация
E-mail: ivanzotkin7@gmail.com

Рассматриваются методы и приборы для контроля качества поверхности изделий, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий. Проанализированы особенности формирования поверхностных дефектов при различных технологиях АП и их влияние на эксплуатационные свойства изделия. Представлены современные методы измерения шероховатости и геометрии, включая контактную профилометрию, оптические методы и 3D-сканирование. Изложены неразрушающие методы контроля, такие как рентгеновская томография, ультразвуковая диагностика и термография, с оценкой их возможностей и ограничений. Рассмотрены основные методы постобработки поверхности и их влияние на снижение шероховатости и устранение дефектов.

Ключевые слова: аддитивное производство, качество поверхности, шероховатость, неразрушающий контроль, постобработка поверхности

METHODS AND INSTRUMENTS FOR CONTROLLING THE SURFACE QUALITY OF ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTS

Zotkin I.A., PhD student

MSTU "STANKIN", Moscow, Russian Federation
E-mail: ivanzotkin7@gmail.com

This article discusses methods and devices for controlling the surface quality of products manufactured using additive technologies. It analyzes the characteristics of surface defect formation in various AM technologies and their impact on product performance. It presents modern methods for measuring roughness and geometry, including contact profilometry, optical methods, and 3D scanning. Non-destructive testing methods, such as X-ray tomography, ultrasonic diagnostics, and thermography, are described, with an assessment of their capabilities and limitations. The main methods of surface post-processing and their impact on reducing roughness and eliminating defects are considered.

Keywords: additive manufacturing, surface quality, roughness, non-destructive testing, surface post-processing

Аддитивное производство (АП) включает методы послойного создания изделий из металлов, полимеров и композитов. В отличие от традиционной обработки, где материал удаляется, АП формирует деталь путем добавления материала, что позволяет создавать сложную геометрию с внутренними каналами и оптимизированными структурами.

Качество поверхности часто ограничивает применение АП в важных отраслях. Шероховатость, пористость, неполное сплавление, ступенчатость из-за послойного построения и термические дефекты могут снизить прочность, стойкость к коррозии и привести к поломкам. Исследования показывают, что снижение шероховатости и устранение дефектов поверхности могут значительно повысить усталостную прочность металлических SLM-деталей.

В связи с ростом применения АП в наукоемких отраслях важно развивать методы контроля качества поверхности. Сейчас изучаются как стандартные методы (профилометрия, оптическая топография), так и неразрушающие методы (томография, ультразвук, термография, вихретоковый контроль), а также способы постобработки для улучшения качества поверхности до уровня традиционных технологий.

Цель этого обзора – собрать и оценить существующие методы и приборы для контроля качества АП-изделий, рассмотреть их применение, плюсы и минусы, а также определить дальнейшие направления развития измерительных технологий в этой области.

Особенности формирования поверхности при аддитивном производстве

Формирование поверхности в АП зависит от способа нанесения или плавления материала. В порошковых технологиях (SLM, LPBF, EBM) поверхность создается при локальном плавлении порошка лазером или электронным лучом. Неравномерное распределение энергии, нестабильность расплава и свойства расплава приводят к образованию несплавленных частиц, брызг и микрократеров. Эти дефекты усиливаются при увеличении толщины слоя и загрязненном порошке.

В технологиях DED в расплав подается порошок или проволока. Большая зона нагрева и размер наплавляемых валиков создают более грубую поверхность, чем в SLM, что требует дополнительной обработки и контроля.

В полимерных технологиях FDM/FFF поверхность формируется из чередующихся дорожек материала. Форма дорожек, степень их сплющивания и сцепление между слоями зависят от температуры, скорости печати, высоты слоя и охлаждения. Плохая адгезия слоев приводит к микротрещинам и расслоениям, которые часто видны на поверхности и обнаруживаются простыми методами [1].

Важна ориентация изделия. При создании наклонных и кривых поверхностей возникает эффект «ступенчатости», когда слои образуют перепады высоты. Чем больше наклон, тем заметнее эффект и выше шероховатость. Поэтому для оценки поверхности нужны 3D-методы измерений.

Свойства материала важны для формирования поверхности. Для металлических порошков значимы размер, форма частиц, наличие пленок и загрязнений. Для полимеров – вязкость расплава и содержание добавок. Использование переработанного порошка может увеличить пористость и шероховатость, что влияет на результаты измерений и выбор методов контроля.

Способы измерения шероховатости и формы поверхности

Контактная профилометрия – надежный способ оценки шероховатости. Профиль поверхности измеряется алмазным щупом и на его основе вычисляются параметры, такие как R_a , R_z и R_q [4]. Это позволяет точно сравнивать результаты обработки и оценивать, как параметры печати влияют на изделие. Но если форма сложная, щуп может не добраться до всех нужных мест.

Оптические профилометры на основе конфокальной микроскопии дают хорошее разрешение и позволяют строить трехмерные модели поверхности, не касаясь ее. Они подходят для анализа микрогеометрии после SLM и DED, где есть резкие перепады высот и отдельные частицы порошка. При этом ни то, как материал отражает свет, ни его цвет не влияют на результаты, что делает этот способ подходящим для металлов и полимеров [5].

Интерференционные методы, например интерферометрия белого света, позволяют измерять высоту с точностью до нанометра, что важно для деталей, требующих высокой точности. Но если поверхность имеет большие перепады высот или изначально очень шероховатая, она может не попасть в рабочий диапазон прибора. Поэтому интерферометрию чаще используют на заключительных этапах, когда шероховатость уже снижена до 0,1–1,0 мкм [6].

Методы структурированного света и стереофотограмметрия – это способы оптического 3D-измерения. Они позволяют быстро получать цифровые модели поверхности и сравнивать их с CAD-моделью, чтобы найти отклонения от формы. Для крупных и сложных деталей это часто единственный способ провести полную проверку геометрии. Современные сканеры обеспечивают погрешность 10–30 мкм, чего достаточно для большинства деталей [3].

Гибридные измерительные системы объединяют оптические и контактные способы измерения. Щуп используют в труднодоступных местах, а оптическую головку – для быстрой оценки больших участков. Такие решения – хороший выбор, когда важны точность, скорость и возможность использовать разные способы измерения, особенно при контроле серийных изделий [7].

Способы неразрушающего контроля поверхности и структуры

Рентгеновская компьютерная томография (ХСТ) позволяет одновременно оценить внутреннюю структуру и состояние поверхности. Исследования показывают, что ХСТ – лучший способ обнаружить поры, несплавления и трещины как на поверхности, так и внутри детали [7]. Современные системы микротомографии обеспечивают разрешение до нескольких микрометров, что позволяет анализировать мелкие дефекты.

Но томография – дорогой способ контроля, и сканирование занимает много времени. К тому же для крупных деталей нужно мощное излучение, что может ухудшить качество изображения. Поэтому предлагается сканировать только важные участки, чтобы сэкономить время и снизить требования к оборудованию [8].

Ультразвуковой контроль (УТ) и фазированные решетки (РАУТ) используются для контроля сварных соединений и литых деталей, их адаптируют для контроля изделий. Ультразвук позволяет обнаружить крупные несплавления и трещины в металлических деталях, полученных методом DED или LPBF. Но высокая шероховатость и сложная форма поверхности мешают прохождению ультразвука и усложняют анализ результатов. Поэтому разрабатываются специальные призмы и схемы контроля, которые компенсируют эти факторы [2].

Термография, как пассивная, так и активная, используется для полимерных и композитных изделий. При активной термографии поверхность нагревают или охлаждают, а затем измеряют, как меняется температура. Дефекты, такие как полости и области с плохой теплопроводностью, приводят к изменениям температуры на термограммах. Такой способ подходит для деталей, изготовленных методом FDM и SLA, с внутренними полостями и дефектами соединения слоев [9].

К неразрушающим методам также относятся вихретоковый контроль, магнитопорошковая дефектоскопия и капиллярный контроль. Они позволяют обнаружить дефекты на поверхности металлических деталей. Но если поверхность изделия очень шероховатая, капиллярный контроль становится менее эффективным, так как краситель заполняет неровности и приводит к ложным результатам. Тем не менее, если сочетать эти методы с предварительной обработкой поверхности, можно обнаружить трещины и несплавления [13].

Методы постобработки поверхности

Финишная обработка поверхностей изделий, полученных аддитивным производством, играет решающую роль в обеспечении качества. Механические методы, такие как фрезерование, шлифование и полировка, могут значительно уменьшить шероховатость, но требуют прямого доступа инструмента к обрабатываемой области. Для деталей с внешними вращающимися поверхностями и плоскими гранями эти методы по-прежнему очень действенны и экономически целесообразны [10].

Для сложных и замкнутых полостей все чаще применяются абразивная обработка потоком и виброабразивная обработка. В процессах абразивной обработки потоком вязкая абразивная среда прокачивается через внутренние каналы детали, постепенно сглаживая выступающие неровности. Этот подход позволяет заметно улучшить качество внутренних поверхностей, которые недоступны для обычной механической обработки [11].

Электрохимическая полировка (ЭХП) основана на растворении поверхностного слоя металла при анодном процессе. В областях с максимальной плотностью тока, обычно на выступах, материал растворяется быстрее, чем во впадинах, что приводит к выравниванию микрорельефа. Для типичных изделий SLM из нержавеющей сталей и титановых сплавов электрохимическая полировка позволяет снизить Ra с 8–15 мкм до 1–2 мкм и даже ниже [11]. Важно правильно подобрать состав электролита и режим обработки, чтобы избежать коррозии.

Электролитно-плазменная обработка (ЭПП) развивает идеи ЭХП и позволяет достичь еще большей чистоты поверхности. В области между деталью и электролитом образуется плазменный слой, который интенсивно сглаживает выступы на микроскопическом уровне. ЭПП отличается высокой скоростью обработки и хорошей повторяемостью результатов, что делает ее многообещающим подходом для серийного производства важных деталей, изготовленных методом аддитивного производства [12].

Химическая обработка и растворяющая постобработка широко используются для полимерных изделий, особенно из ABS и PLA. Под воздействием паров растворителя или специального реагента поверхностный слой частично размягчается и переформируется, сглаживая границы между слоями и уменьшая шероховатость. Этот подход активно применяется при изготовлении визуальных прототипов и некоторых элементов корпусных изделий в электронике и приборостроении [14].

Современные тенденции развития методов контроля

Современные подходы к контролю качества поверхности изделий аддитивного производства (АП) связаны с внедрением в оборудование измерительных систем. In-situ мониторинг использует камеры, фотодиоды, пирометры и сканеры для отслеживания послойного процесса. Эти данные помогают обнаруживать отклонения при плавлении, нанесении порошка или укладке полимера и прогнозировать дефекты до завершения создания детали.

Интересен машинный анализ данных контроля поверхности. На основе данных печати, геометрии и измерений создаются модели для предсказания дефектов и внесения изменений в процесс. Это позволяет перейти к управлению качеством на опережение.

Стандартизация развивается через документы ISO/ASTM, определяющие термины и методы контроля изделий АП. Устанавливаются требования к описанию поверхности, классификации дефектов, измерениям и валидации оборудования. Это делает результаты сопоставимыми и облегчает сертификацию изделий для авиации, медицины и энергетики.[15]

Разрабатываются цифровые двойники процессов АП, объединяющие контроль поверхности с моделями структуры и напряжений. Это учитывает влияние поверхностных дефектов на ресурс изделия при проектировании, позволяя улучшить геометрию, режимы печати и постобработки. В будущем такие двойники могут стать основой замкнутых систем управления качеством в аддитивном производстве.

Заключение

Обзор литературы говорит о том, что контроль качества поверхности изделий АП – это задача, решаемая с применением разных подходов. Метрологические методы дают точную оценку шероховатости и отклонений, а неразрушающий контроль выявляет дефекты на поверхности и внутри. Постобработка поверхности важна для обеспечения качества и расширения применения изделий АП.

Перспективны интеграция измерительных систем в процессы АП, развитие in-situ мониторинга и анализа данных на основе машинного обучения. Эти решения позволяют не только фиксировать дефекты, но и предотвращать их. Дальнейшее развитие стандартов будет способствовать формированию общего подхода к оценке качества поверхности и сопоставимости результатов.

Таким образом, развитие методов и приборов для контроля качества поверхности изделий АП объединяет метрологию, неразрушающий контроль, материаловедение и цифровые технологии. Комплексный подход, включающий моделирование, эксперименты и анализ данных, важен для создания надежных процессов АП с предсказуемым качеством поверхности и свойств изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Захаров, О.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Часть 1. Обзор профильных фильтров / О.В. Захаров, А.С. Яковишин, А.В. Жуков // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2022. – № 2 (93). – С. 22–37.
2. Методология характеристики рельефа 3D-поверхности по ее профильным и топографическим параметрам в нанометровом диапазоне / С.Ю. Золотаревский, С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко [и др.] // Метрология. – 2013. – № 2. – С. 4–12.
3. Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции для дискового морфологического фильтра / О.В. Захаров, А.Г. Лаптев, В.Г. Лысенко [и др.] // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 35–40.

4. New system of functional parameters for surface texture analysis / M.Y. Zakharchenko, O.V. Zakharov, A.V. Kochetkov, P.M. Salov // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Pp. 1866–1870.
5. Алгоритмизация вычисления фрактальных параметров рельефа шероховатой поверхности по ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 / Б.Н. Марков, Д.А. Мастеренко, П.Н. Емельянов, В.И. Телешевский // *Измерительная техника*. – 2020. – № 8. – С. 20–27.
6. Григорьев, С.Н. Метод повышения энергоэффективности технологий вакуумно-плазменного нанесения покрытий / С.Н. Григорьев, Е.М. Шумихина, К.А. Змиева // *Вестник МГТУ Станкин*. – 2010. – № 1 (9). – С. 82–87.
7. Григорьев, С.Н. Возможности технологии аддитивного производства для изготовления сложно-профильных деталей и получения функциональных покрытий из металлических порошков / С.Н. Григорьев, Т.В. Тарасова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2015. – № 10 (724). – С. 5–10.
8. Gibson, I. *Additive Manufacturing Technologies* / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker // Springer. – 2021.
9. Maldague, X. *Theory and Practice of Infrared Thermography* / X. Maldague // Springer. – 2001.
10. Kalpakjian, S. *Manufacturing Engineering and Technology* / S. Kalpakjian, S. Schmid // Prentice Hall. – 2013.
11. *Electrochemical Surface Finishing of Additively Manufactured Metals* / C. Schuh [et al.] // *Surface Engineering*. – 2020.
12. *Plasma and Chemical Polishing of Additively Manufactured Parts* / F. Ning [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022.
13. *Additive Manufacturing – Monitoring and Control of Metal Deposition Processes* / T. DebRoy [et al.] // *Progress in Materials Science*. – 2020.
14. *Machine Learning in Additive Manufacturing: A Review* / Y. Zhang [et al.] // *Additive Manufacturing*. – 2021.
15. ISO/ASTM 52900, 52910, 52921 *Additive Manufacturing – General Principles and Qualification Guidelines*.

ИННОВАЦИОННЫЙ КОПЕР ДЛЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ PDC-РЕЗЦОВ БУРОВЫХ ДОЛОТ

Ибатуллин И.Д., д.т.н., профессор, **Новиков В.А.**, доцент, к.т.н., доцент,
Копытин Д.О. , аспирант, **Шальнова Д.Э.**, студент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: dima-smith-21@yandex.ru

Приведен анализ характерных разрушений PDC-резцов, последние тенденции в испытаниях и исследованиях разрушений резцов. Также представлен инновационный копер для испытаний на усталость при циклических ударных нагрузках PDC-резцов буровых долот.

Ключевые слова: PDC-зубки, испытания на усталость, копер, прочность, входной контроль качества зубков, фрактографический анализ

INNOVATIVE CHECKER FOR CYCLIC IMPACT TESTS FOR FATIGUE OF PDC DRILL BITS CUTTERS

Ibatullin I.D., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor,
Novikov V.A., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Kopytin D.O. , PhD student, **Shalnova D.E.**, student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: dima-smith-21@yandex.ru

An analysis of characteristic failures of PDC cutters and the latest trends in testing and investigation of cutter failures are presented. Also presented is an innovative pile driver for cyclic impact fatigue testing of PDC drill bit cutters.

Keywords: PDC teeth, fatigue tests, pile driver, strength, incoming quality control of teeth, fractographic analysis

В современной нефтегазовой отрасли, пережившей «эпоху легкой нефти», все острее встает вопрос об истощении существующих месторождений. Новые месторождения оказываются гораздо менее рентабельными ввиду сложного и дорогостоящего процесса нефтедобычи. Нефтедобыча и геологоразведка в сложных геологических условиях требуют использования новых технологий. Одним из важных факторов успешного бурения являются PDC-резцы (polycrystalline diamond cutter – поликристаллический алмазный резец), которые представляют собой вооружение бурового долота.

В процессе бурения PDC-резцы испытывают высокие эксплуатационные нагрузки, такие как коррозионные, абразивные, температурные, а также значительные ударные нагрузки и вибрации. При этом благодаря своим физико-химическим свойствам PDC-резцы обладают высокой степенью износостойкости, твердостью, жесткостью, температурной и коррозионной стойкостью. Для успешного бурения на долото должны устанавливаться только качественные PDC-резцы, в противном случае преждевременное разрушение резцов, их сколы, потеря алмазной пластины или же быстрое стачивание режущей кромки влекут за собой значительные технологические простои в бурении, требуемые для замены долота или замены его вооружения.

Поскольку сильно различается качество как резцов партий различных производителей, так и резцов различных партий одного производителя, встает вопрос управления качеством устанавливаемых на буровое долото PDC-резцов. Требуемое качество могут обеспечить только испытания входного контроля и грамотные критерии оценки разрушения и качества PDC-резцов. Существует ряд методик оценки износа долот: международная методика IADC (International Association of Drilling Contractors), методики ВНИИБТ, руководство по оценке

износа долот типа PDC в промысловых условиях компании ООО «ПетроИнжиниринг». Но данные методики оценивают долото и его вооружение после окончания процесса бурения с целью принятия решения о дальнейшей эксплуатации долота или его ремонте [1].

Также необходимо обратить внимание на последние результаты исследований в области испытаний PDC-резцов и оценки их разрушения при помощи фрактографического анализа. В опубликованных результатах исследования физических механизмов эксплуатационной повреждаемости и разрушения были сделаны выводы [4] о том, что сколы и сломы алмазного слоя PDC-резцов вызваны в первую очередь усталостным механизмом. Это связано с накоплением и слиянием в алмазных зернах дефектов (трещин) с последующим их разрушением. Снимки структуры, полученные на электронном микроскопе (рис. 1, 2), указывают на различные паттерны повреждений и характер их накопления внутри алмазных зерен поликристаллического слоя PDC-резцов [2, 3].

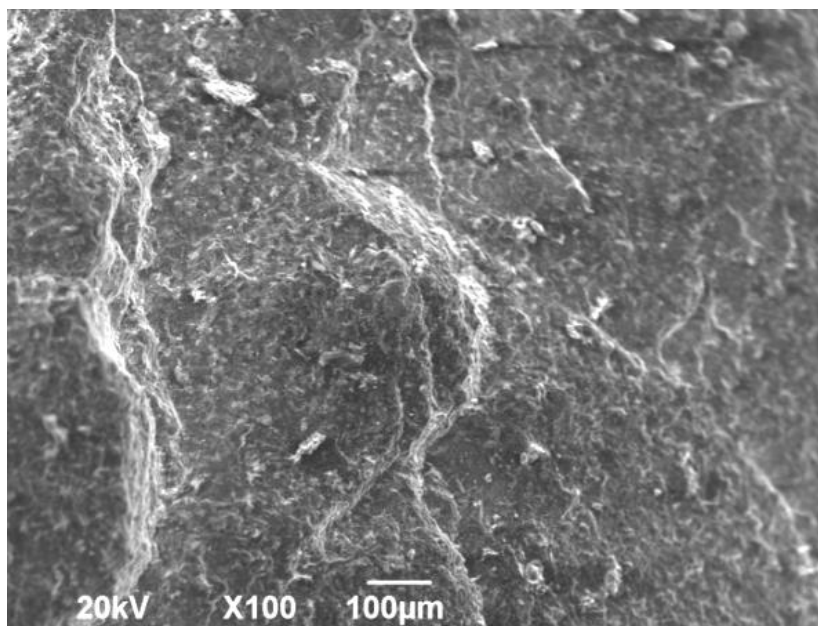


Рис. 1. Внешний вид разрушенной поверхности PDC-резцов со слоистым паттерном (волнообразный)

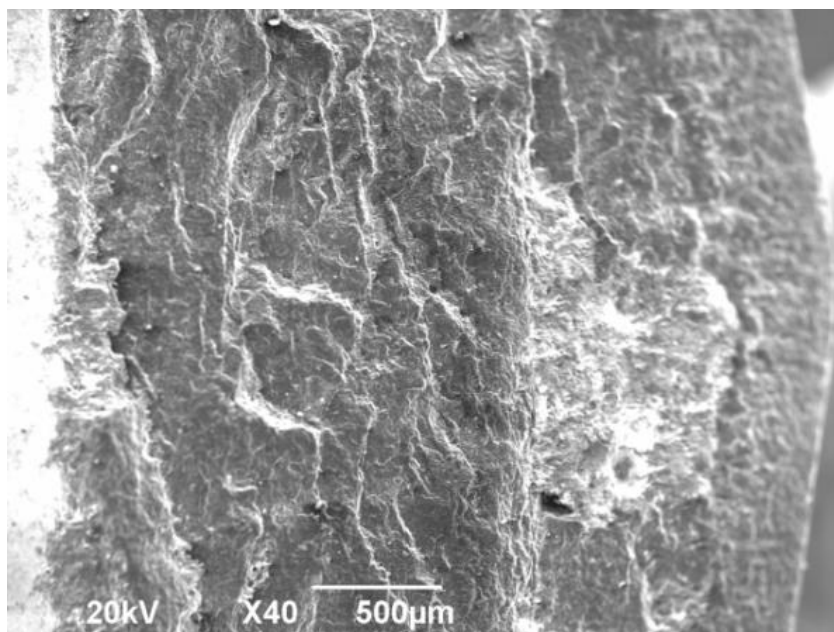


Рис. 2. Внешний вид разрушенной поверхности PDC-резцов со слоистым паттерном (слоистый)

Данные выводы позволяют по-новому взглянуть на методики испытаний и указывают на необходимость поиска новых подходов к испытаниям и использования нового оборудования для их проведения.

Поскольку усталостный механизм является одним из основных факторов разрушения PDC-резцов, возникает необходимость в разработке устройства для проведения циклических ударных испытаний на усталость для PDC-резцов.

В настоящий момент идет разработка инновационного копра нового типа для проведения испытания PDC-резцов на усталость при испытании на удар. Копер обладает высокой производительностью, позволяя за один рабочий цикл испытать два PDC-резца, причем один цикл длится не более 1 минуты.

Копер (рис. 3, 4) по сравнению с классическими вертикальными и маятниковыми копрами обладает следующими отличительными особенностями: энергия удара задается за счет программного задания скорости горизонтального движения груза, а не за счет высоты подъема груза; отсутствует обратный холостой ход; движение бойка в обратную сторону нацелено на испытание второго резца, что позволяет в два раза ускорить испытания, а специальная оправка обеспечивает нанесение ударов по режущей кромке, установленной под углом 15° , имитирующим угол установки PDC-резца на буровом долоте по отношению к горной породе в забое.

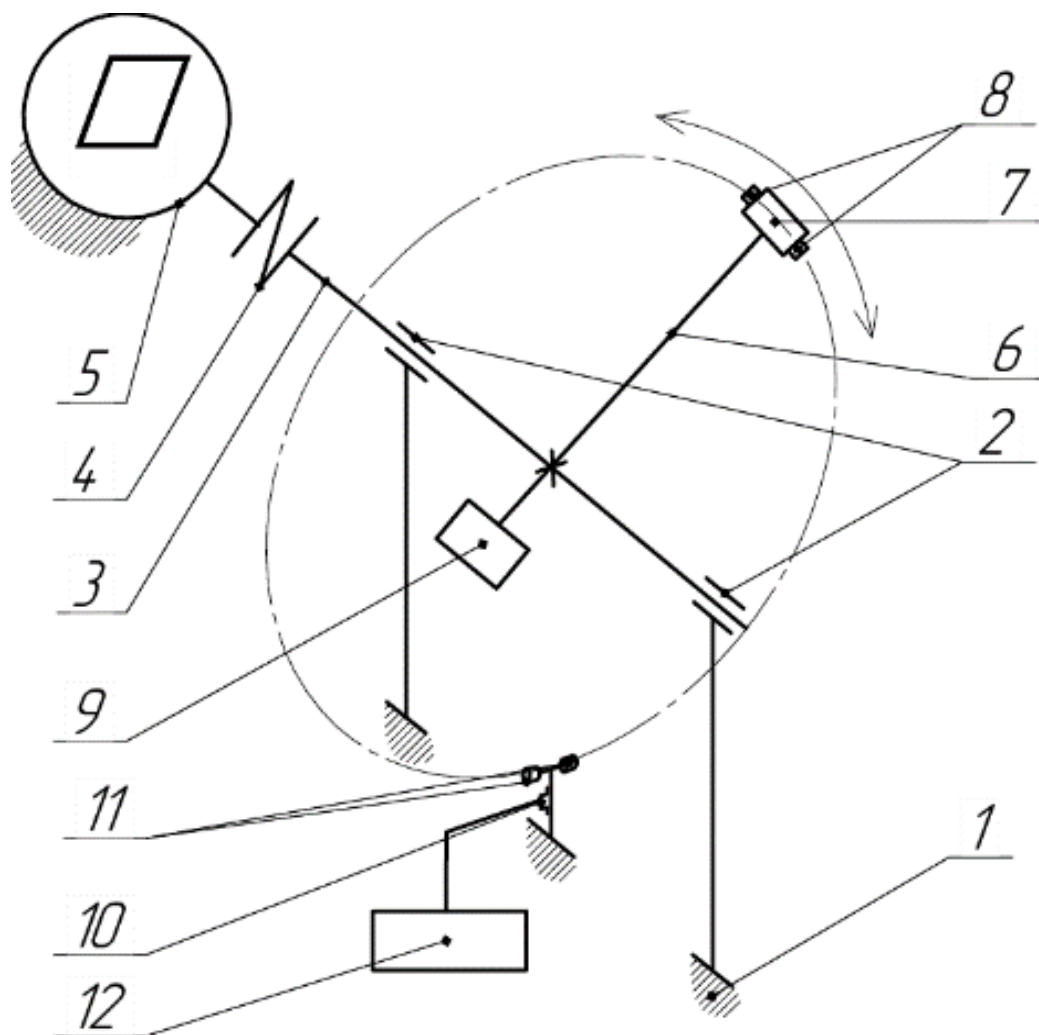


Рис. 3. Схема копра:

- 1 – корпус установки, 2 – опорные штанги, 3 – вал, 4 – муфта, 5 – электропривод, 6 – шпиндель, 7, 8 – боек со сменными наконечниками, 9 – противовес, 10 – тензометрический датчик, 11 – специальная оправка с PDC-резцами, 12 – система сбора данных

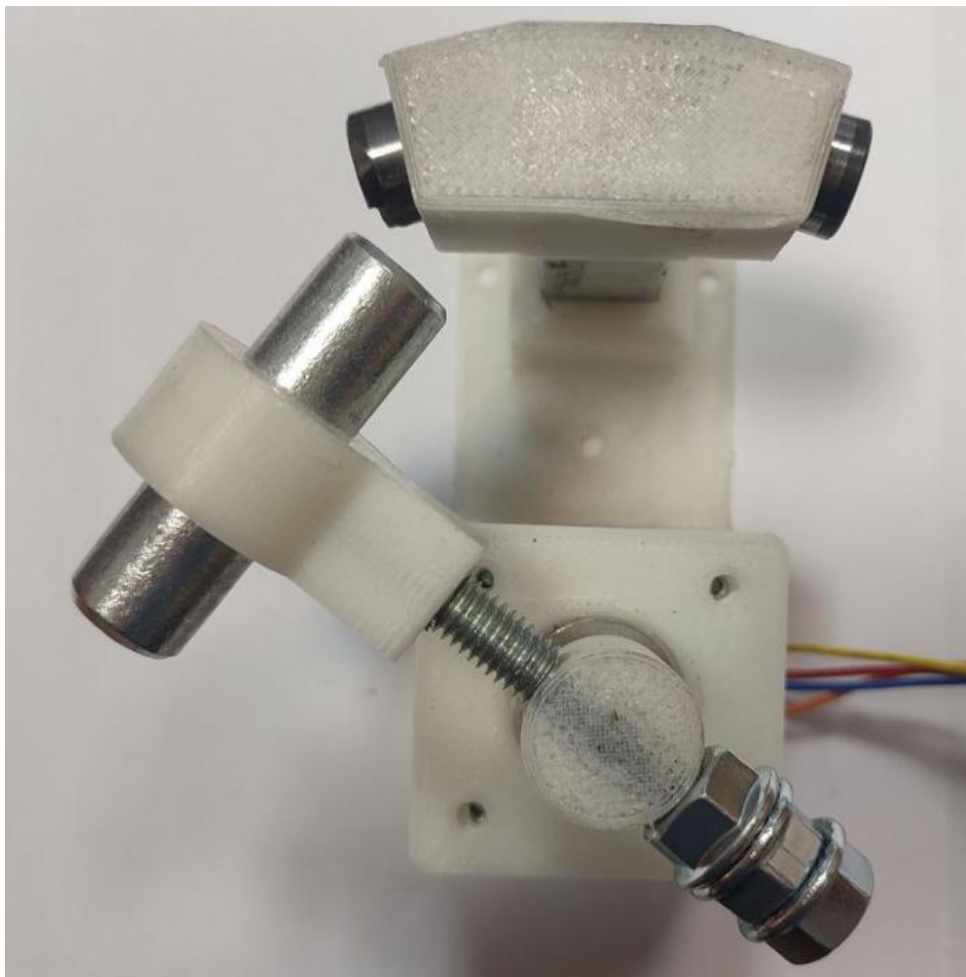


Рис. 4. Функциональный малогабаритный макет копра

Таким образом, благодаря своим техническим характеристикам копер сможет стать эффективным устройством для ударных испытаний PDC-резцов на усталость. Это, в свою очередь, повысит эффективность испытаний входного контроля, а также позволит установить корреляцию данных по испытаниям PDC-резцов с данными работы буровых долот, вооруженных PDC-резцами, на забое из одной и той же партии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по оценке износа долот типа PDC в промысловых условиях / Я.В. Мясников, А.В. Ионенко, С.Г. Гаджиев [и др.] // Бурение и нефть. – 2014. – № 3.
2. Третьяк, А.Я. Фрактографический анализ разрушения PDC-резцов / А.Я. Третьяк, К.А. Борисов // Известия Томского политехнического университета. – 2019. – № 5. – С. 169–177.
3. Atlas of Fractography / Пер. с англ. – Москва: Мир, 1987. – 324 с.
4. Фрактографический анализ механизмов разрушения PDC-резцов / В.А. Колибасов, И.Д. Ибатуллин, Д.О. Копытин [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2025. – № 10 (305). – С. 40–45.

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНОЙ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ В МАШИНАХ ТРЕНИЯ

Карасев Н.И. , старший преподаватель, **Галлямов А.Р.**, к.т.н., доцент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: karasevn.i@mail.ru

Исследовано влияние паразитной тензочувствительности аппаратной части измерительных каналов на точность измерений в машинах трения. Рассмотрены причины возникновения дополнительных выходных сигналов тензоусилителей, обусловленные механическими деформациями печатных плат и элементной базы. Проведено экспериментальное сравнение различных конструктивных исполнений резистивных компонентов. Показано, что выбор элементной базы оказывает существенное влияние на стабильность нулевых показаний и достоверность измерений нагрузки и момента трения.

Ключевые слова: паразитная тензочувствительность, тензоусилитель, измерительный канал, машина трения, погрешность измерений, элементная база

INFLUENCE OF PARASITIC STRAIN SENSITIVITY OF MEASURING CHANNEL HARDWARE ON MEASUREMENT ACCURACY IN FRICTION MACHINES

Karasev N.I. , senior lecturer, **Gallyamov A.R.**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: karasevn.i@mail.ru

The effect of parasitic strain sensitivity of the measuring channel hardware on the measurement accuracy in friction machines is investigated. The reasons for the appearance of additional output signals of strain gages caused by mechanical deformations of printed circuit boards and the element base are considered. An experimental comparison of various designs of resistive components has been carried out. It is shown that the choice of the element base has a significant impact on the stability of zero readings and the reliability of measurements of the load and moment of friction.

Keywords: parasitic strain sensitivity, strain gauge, measuring channel, friction machine, measurement error, element base

Тензометрические измерительные каналы широко применяются в машинах трения для регистрации нормальной нагрузки и крутящего момента в процессе трибологических испытаний. Достоверность получаемых экспериментальных данных в значительной степени определяется точностью и стабильностью измерительных каналов, поскольку погрешности измерения нагрузки и момента непосредственно влияют на оценку коэффициента трения и интенсивности изнашивания [1–3].

В большинстве современных машин трения в качестве первичных преобразователей используются тензометрические системы, работа которых основана на преобразовании механических деформаций упругих элементов в электрический сигнал. При этом на выходной сигнал измерительного канала оказывают влияние не только деформации, обусловленные действием измеряемых нагрузок, но и дополнительные факторы, связанные с конструктивными и аппаратными особенностями измерительного тракта [4].

В условиях эксплуатации машин трения измерительная аппаратура подвергается воздействию механических и термомеханических факторов, включая вибрации, нагрев конструктивных элементов и изменение напряженно-деформированного состояния узлов крепления. Указанные воздействия приводят к микродеформациям печатных плат, корпусов усилителей и элементов монтажа, что вызывает изменение электрических параметров компонентов

измерительных цепей [5]. В результате в выходном сигнале тензоусилителей возникает дополнительная составляющая, не связанная с действием измеряемых нагрузок.

Данный эффект принято характеризовать как паразитную тензочувствительность аппаратной части измерительного канала. Она проявляется в виде дрейфа нулевых показаний, увеличения шумовой составляющей и снижения повторяемости результатов измерений. Как отмечается в работах по тензометрии и измерительным преобразователям, вклад паразитной тензочувствительности может быть сопоставим с полезным сигналом, особенно при измерении малых нагрузок и моментов [6, 7].

Существенное влияние на уровень паразитной тензочувствительности оказывает элементная база тензоусилителей. Конструктивное исполнение резистивных компонентов, способ их крепления и взаимодействие с деформируемой печатной платой определяют чувствительность аппаратной части измерительного канала к внешним механическим воздействиям [8]. В частности, использование чип-резисторов, жестко закрепленных на плате, может приводить к повышенной чувствительности усилителя к изгибным деформациям, тогда как применение резисторов с гибкими выводами позволяет снизить данный эффект.

Несмотря на наличие исследований, посвященных повышению точности тензометрических измерений, вопросы влияния аппаратной реализации тензоусилителей и элементной базы на паразитную тензочувствительность измерительных каналов машин трения остаются недостаточно систематизированными. Это определяет актуальность экспериментального анализа данного вида погрешности и разработки конструктивных решений, направленных на ее снижение.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование влияния паразитной тензочувствительности аппаратной части измерительных каналов на точность измерений в машинах трения и оценка эффективности различных вариантов элементной базы тензоусилителей в условиях механических воздействий.

Источники паразитной тензочувствительности аппаратной части измерительных каналов

Паразитная тензочувствительность аппаратной части измерительных каналов обусловлена совокупным влиянием механических, конструктивных и схемных факторов, не связанных непосредственно с деформацией первичного упругого элемента. В отличие от полезной тензочувствительности, формируемой тензорезисторами, установленными на силовоспринимающем элементе, паразитная составляющая возникает в элементах измерительного тракта и носит неконтролируемый характер [4, 6].

Одним из основных источников паразитной тензочувствительности являются механические деформации печатных плат тензоусилителей. В условиях эксплуатации машин трения печатные платы подвергаются изгибным и крутильным деформациям под действием вибраций, температурных градиентов и усилий крепления. Эти деформации приводят к изменению геометрии токопроводящих дорожек и механическому нагружению электронных компонентов, что вызывает изменение их электрических параметров [7].

Существенную роль в формировании паразитной тензочувствительности играет элементная база тензоусилителей, прежде всего резистивные компоненты. Как показано в работах по тензометрии и схемотехнике измерительных преобразователей, резисторы, жестко закрепленные на поверхности печатной платы, обладают выраженной чувствительностью к механическим деформациям основания [5, 8]. При изгибе платы в таких элементах возникают дополнительные напряжения, приводящие к изменению сопротивления и появлению паразитного выходного сигнала.

Влияние паразитной тензочувствительности усиливается при использовании высокоомных и прецизионных резисторов, применяемых в схемах тензоусилителей для обеспечения высокого коэффициента усиления и низкого уровня шумов. В этих условиях даже малые механические деформации аппаратной части могут приводить к заметному дрейфу нулевых показаний и снижению стабильности измерительного канала [6].

Дополнительным источником паразитной тензочувствительности являются внутренние механические напряжения, возникающие при монтаже и эксплуатации аппаратуры. Усилия

затяжки крепежных элементов, температурные деформации корпусов и неравномерное распределение нагрузок в узлах установки измерительных модулей приводят к появлению остаточных напряжений в печатных платах и электронных компонентах. Данные напряжения изменяются во времени и под воздействием внешних факторов, что обуславливает нестабильность выходного сигнала измерительного канала [7].

Таким образом, паразитная тензочувствительность аппаратной части измерительных каналов имеет многофакторную природу и обусловлена взаимодействием механических деформаций, конструктивных особенностей печатных плат и свойств элементной базы тензоусилителей. Это определяет необходимость экспериментального исследования влияния конструктивного исполнения резистивных компонентов на уровень паразитной тензочувствительности и стабильность измерительных каналов, что рассматривается в следующем разделе.

Экспериментальное исследование влияния элементной базы тензоусилителей на паразитную тензочувствительность

Для оценки влияния элементной базы тензоусилителей на уровень паразитной тензочувствительности было проведено экспериментальное исследование, направленное на сравнение выходных сигналов измерительных каналов при механических воздействиях, не связанных с действием измеряемой нагрузки. Основное внимание уделялось анализу влияния конструктивного исполнения резистивных компонентов, применяемых в схемах тензоусилителей.

Экспериментальная установка включала тензоусилитель, выполненный на печатной плате, с возможностью замены резистивных компонентов без изменения топологии схемы. В качестве исследуемых вариантов использовались чип-резисторы, жестко закрепленные на поверхности печатной платы, а также резисторы с гибкими выводами, допускающими частичную механическую развязку от деформируемого основания. Выбор данных типов элементов обусловлен их широким применением в измерительной аппаратуре и различиями в механическом взаимодействии с печатной платой [5, 8].

Механическое воздействие на печатную плату осуществлялось путем контролируемого изгиба в зоне крепления тензоусилителя, имитирующего эксплуатационные деформации, возникающие в процессе работы машины трения. При этом вход измерительного канала оставался разомкнутым, а полезная тензометрическая нагрузка отсутствовала, что позволяло регистрировать исключительно паразитную составляющую выходного сигнала.

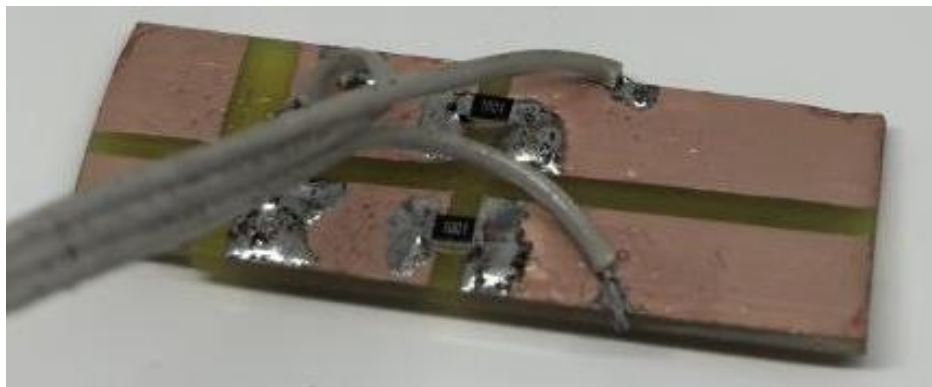
Схема проведения эксперимента и расположение исследуемых элементов приведены на рис. 1. В ходе испытаний регистрировались изменения выходного напряжения тензоусилителя при приложении механического воздействия, а также оценивалась стабильность нулевых показаний при повторных циклах нагружения и разгрузки.

Результаты экспериментальных измерений представлены в виде зависимостей выходного сигнала тензоусилителя от величины механического воздействия (рис. 2).

Анализ полученных графиков показывает, что при использовании чип-резисторов наблюдается выраженный рост паразитного сигнала при деформации печатной платы. В то же время применение резисторов с гибкими выводами приводит к существенному снижению амплитуды паразитного сигнала и повышению стабильности нулевого уровня.

Количественная оценка результатов эксперимента показала, что использование резисторов с гибкими выводами позволяет снизить уровень паразитной тензочувствительности в 2–3 раза по сравнению с применением чип-резисторов при сопоставимых условиях механического воздействия. Полученные данные согласуются с результатами исследований, представленных в работах по тензометрии и аппаратной реализации измерительных преобразователей [6, 7].

Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают существенное влияние элементной базы тензоусилителей на уровень паразитной тензочувствительности измерительных каналов. Выбор конструктивного исполнения резистивных компонентов является эффективным средством повышения стабильности нулевых показаний и достоверности измерений в машинах трения.



a



б

Рис. 1. Схема экспериментального исследования паразитной тензочувствительности тензоусилителя:
а – чип-резисторы, б – выводные резисторы

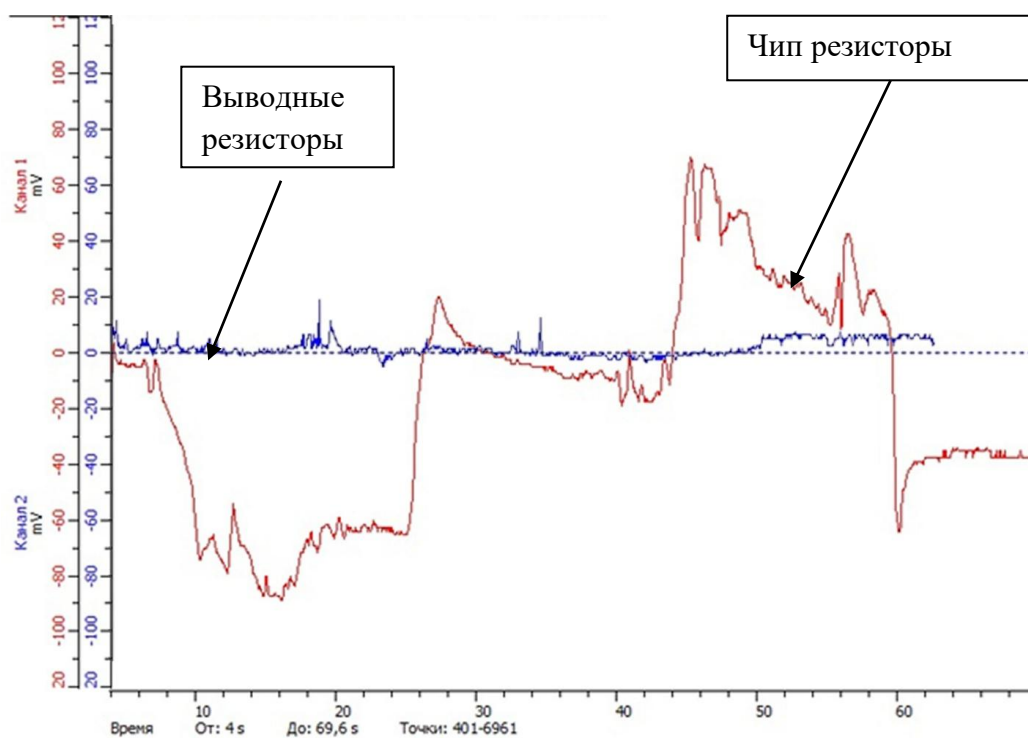


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала тензоусилителя от механического воздействия для различных типов резистивных компонентов

Выводы

1. Показано, что механические деформации печатных плат тензоусилителей приводят к возникновению дополнительного выходного сигнала, не связанного с действием измеряемых нагрузок, и вызывают дрейф нулевых показаний измерительного канала.

2. Экспериментально подтверждено, что конструктивное исполнение резистивных компонентов тензоусилителей оказывает определяющее влияние на уровень паразитной тензочувствительности аппаратной части измерительных каналов.

3. Установлено, что применение резисторов с гибкими выводами позволяет снизить амплитуду паразитного выходного сигнала в 2–3 раза по сравнению с использованием чип-резисторов при сопоставимых условиях механического воздействия.

4. Полученные результаты подтверждают целесообразность учета механических свойств и конструктивных особенностей элементной базы тензоусилителей при проектировании и модернизации тензометрических измерительных каналов машин трения с целью повышения достоверности измерений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Костецкий, Б.И. Трение, изнашивание и смазка машин / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов. – Киев: Техника, 1970. – 396 с.
3. Stachowiak, G.W. Engineering Tribology / G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor. – 4th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. – 884 p.
4. Буше, М.И. Основы тензометрии / М.И. Буше. – Москва: Энергия, 1974. – 288 с.
5. Белоусов, А.В. Тензорезисторные измерительные преобразователи: учеб. пособие / А.В. Белоусов. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 176 с.
6. Bentley, J.P. Principles of Measurement Systems / J.P. Bentley. – 4th ed. – Harlow: Pearson Education, 2005. – 592 p.
7. Webster, J.G. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook / J.G. Webster. – Boca Raton: CRC Press, 1999. – 2640 p.

РАБОЧАЯ СРЕДА С КОМПЛЕКСНЫМ ПЛАСТИФИКАТОРОМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Литовка О.В., старший преподаватель, **Левко В.А.** , профессор, д.т.н., доцент

*Сибирский государственный университет науки и технологии
им. академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация
E-mail: levko@sibsau.ru*

Рассмотрены составы рабочих сред для обработки абразивным потоком. Отмечены недостатки существующих составов при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов. Предложено в состав рабочей среды ввести в качестве комплексного пластификатора мазеобразные алмазные пасты. Проведена обработка абразивным потоком рабочей среды с комплексным пластификатором. Экспериментально установлено повышение производительности обработки от 100 до 240 %.

Ключевые слова: рабочая среда, комплексный пластификатор, обработка абразивным потоком, труднообрабатываемые материалы

MEDIA WITH A COMPLEX PLASTICIZER FOR ABRASIVE FLOW MACHINING OF PARTS MADE FROM HARD-TO-MACHINE MATERIALS

Litovka O.V., senior lecturer,
Levko V.A. , Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation
E-mail: levko@sibsau.ru*

The compositions of media for abrasive flow machining are examined. The shortcomings of existing compositions when machining parts made of difficult-to-machine materials are highlighted. It is proposed to incorporate ointment-like diamond pastes into the media as a complex plasticizer. Abrasive flow machining of a working media containing a complex plasticizer was conducted. Experiments demonstrated an increase in machining productivity from 100 % to 240 %.

Keywords: media, complex plasticizer, abrasive flow machining, hard-to-machine materials

Обработка абразивным потоком является одним из нетрадиционных методов финишной обработки, при котором два противоположных цилиндра установки выдавливают вязкоупругую рабочую среду, наполненную абразивными зернами, вперед и назад через каналы обрабатываемой заготовки. При этом вязкость полимерной основы рабочей среды, размер, тип и весовое содержание абразивного зерна варьируются для достижения конкретных результатов окончательной обработки [1].

В качестве вязкоупругой основы рабочей среды применяют полибороксан [2, 3], натуральный каучук [4], ксантановую камедь [5] и полидиметилсилоксановые каучуки [6].

Известно, что вязкость рабочей среды зависит от типа вязкоупругого полимера, количества используемого в нем пластификатора (смешивающего масла) и абразивного наполнителя. Чем больше весовое содержание абразива в среде и меньше весовое содержание пластификаторов, тем общая вязкость среды выше для случая одинаковой полимерной основы. Более высокая вязкость рабочей среды увеличивает прочность связи между абразивными частицами и полимерной основой, вызывая большее удаление материала с заготовки и создавая однородную поверхность.

Более низкая вязкость рабочей среды уменьшает связь между полимерной основой и абразивными частицами, что снижает производительность и качество обработки. Для придания рабочей среде необходимой текучести в полимерную основу добавляют определенную долю углеводородного масла [7].

Проблема использования таких рабочих сред заключается в том, что при перемещении взад-вперед под большим давлением и с высокими скоростями вдоль обрабатываемой поверхности при контакте абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью выделяется значительное количество теплоты трения. Это приводит к быстрому нагреву рабочей среды и резкому снижению ее вязкости, а следовательно, и производительности обработки. Нагрев рабочей среды до определенной температуры может вызвать ее термическую деструкцию и потерю целостности структуры [8].

Таким образом, для обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов необходимо применять вязкоупругие рабочие среды, отвечающие трем основным требованиям. Во-первых, они должны обладать высокой вязкостью, но при этом иметь достаточную текучесть, чтобы реализовывать обработку в труднодоступных местах. Во-вторых, эти рабочие среды должны характеризоваться высокой стойкостью к температурному нагреву. В-третьих, они должны быть инертны к физиологическим жидкостям.

Целью данной работы являлось повышение производительности обработки за счет уменьшения циклов обработки абразивным потоком и увеличение срока службы рабочей среды нового состава. Для этого было предложено в традиционный состав рабочей среды, содержащий полидиметилсилоксановый каучук СКТ и абразивные зерна, добавить комплексный пластификатор (мазеобразную алмазную пасту) в качестве охлаждающего и стабилизирующего поверхностно-активного вещества. Определены следующее соотношение компонентов рабочей среды, масс.: каучук СКТ (ГОСТ 14680-79) – 40 %; алмазная мазеобразная паста (ГОСТ 25593-83) – 10 %; карбид кремния – 50 %.

Кристаллические частицы абразивного наполнителя благодаря избыточной поверхностной энергии ($1\text{--}5 \text{ Дж/м}^2$), обусловленной ненасыщенностью валентных связей поверхностных атомов, при смешении с полимерной основой в определенных условиях вступают во взаимодействие с концевыми гидроксильными группами полидиметилсилоксанового каучука, образуя вокруг себя сольватную оболочку и создавая в полимерной основе сетчатую структуру. Это явление существенно снижает адгезионные свойства рабочей среды, тем самым исключая необходимость включения в ее состав других антиадгезионных добавок.

Алмазные зерна, входящие в состав мазеобразной алмазной пасты, наряду с абразивными частицами карбида кремния участвуют в контактных взаимодействиях с микронеровностями обрабатываемой поверхности и оказывают на нее дополнительное воздействие. Другие составляющие комплексного пластификатора (олеиновая кислота, стеарин, парафин, церезин и другие) выступают в качестве охлаждающего и стабилизирующего поверхностно-активного вещества.

Компоненты рабочей среды смешиваются при их многократном возвратно-поступательном движении через специальное приспособление при определенных температурах, деформациях и напряжениях сдвига, а также последующей выдержке. В результате этого создается сетчатая структура потока рабочей среды с необходимой когезионной и температурной стойкостью.

Исследование обработки абразивным потоком рабочей средой с комплексным пластификатором проведено на установке УЭШ-100 при давлении в системе 12 МПа. В результате обработки образцов из титанового сплава ОТ4 за 50 циклов удалось уменьшить исходную шероховатость поверхности $Ra = 18\text{--}20 \text{ мкм}$ до $Ra = 0,55\text{--}0,62 \text{ мкм}$, что позволило повысить производительность обработки по сравнению с известным аналогом [8] на 160–240 %. При обработке образцов из аустенитно-мартенситной стали 08Х14Н7МЛ за 30 циклов удалось изменить шероховатость поверхности с $Ra = 8,3\text{--}9,1 \text{ мкм}$ до $Ra = 2,4\text{--}2,8 \text{ мкм}$. По сравнению с известным аналогом [6] применение рабочей среды нового состава повысило производительность обработки на 100 %.

По результатам данного исследования можно сформулировать следующие выводы. Комплексный пластификатор, входящий в состав рабочей среды, обеспечивает повышенную стойкость к температурному нагреву, увеличивая срок службы рабочей среды и производительность обработки. Экспериментально установлено, что применение нового состава рабочей среды позволяет повысить производительность обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых материалов от 100 до 240 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Rhoades, L.J. Abrasive Flow Machining for Automatic Surface Finishing and Capacitance Technology for In-Process Surface and Dimensional Metrology / L.J. Rhoades; S.A. Meguid (eds) // *Surface Engineering*. – Springer, Dordrecht. – 1990. – URL: https://doi.org/10.1007/978-94-009-0773-7_46
2. Dong, Z. Study on machining mechanism of high viscoelastic abrasive flow machining for surface finishing / Z. Dong, G. Ya, J. Liu // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2017. – Vol. 231 (4). – Pp. 608–617. – DOI: 10.1177/0954405415586967.
3. Nitin, Dixit. Research trends in abrasive flow machining: A systematic review / Dixit Nitin, Sharma Varun, Kumar Pradeep // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 64. – Pp. 1434–1461. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.009>
4. Rheological characterization of abrasive media and finishing behaviors in abrasive flow machining / Y. Fu, H. Gao, Q. Yan [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 107. – Pp. 3569–3580. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05288-9>
5. Nitin, Dixit. Development and characterization of xanthan gum-based abrasive media and performance analysis using abrasive flow machining / Dixit Nitin, Sharma Varun, Kumar Pradeep // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 67. – Pp. 101–115. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.053>
6. Обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали / В.А. Левко, Н.С. Теряев, О.В. Литовка, П.А. Иванов // *Вестник Самарского гос. университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 122–132. – DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132. – EDN UCYFHO.
7. Petare, A.C. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process / A.C. Petare, N.K. Jain // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 97. – Pp. 741–782. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>
8. А. с. № 1673420 А1 СССР, МПК В24Д 3/34. Масса для абразивной обработки / Фомин Г.И., Лозицкий В.П., Мазур Н.М., Иоктон Б.И. – № 4680530: заявл. 18.04.1989; опубл. 30.08.1991; заявитель Предприятие П/Я Р-6564.

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ДИСТАНЦИОННОМУ ОБУЧЕНИЮ В МАШИНОСТРОЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИМУЛЯТОРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Ляпнев Е.А. [✉], студент, **Жиравский Р.А.**, студент, **Тимофеева А.А.**, к.э.н.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: e.liapnev2004@yandex.ru*

Рассматривается проблема практико-ориентированной подготовки инженеров в условиях дистанционного обучения. Предлагается решение на основе интеграции специализированных симуляторов производственных процессов, моделирующих обработку, сборку, наладку и диагностику оборудования. Описана авторская модель обучения, сочетающая теоретический модуль, сценарные задания в виртуальной среде и систему цифрового контроля. Ожидаемые эффекты включают повышение уровня профессиональных компетенций, безопасности и доступности инженерного образования.

Ключевые слова: дистанционное обучение, машиностроительное образование, симуляторы производственных процессов, практико-ориентированная подготовка, виртуальные тренажеры, цифровизация образования

INNOVATIVE APPROACHES TO DISTANCE LEARNING IN MECHANICAL ENGINEERING USING SIMULATORS OF PRODUCTION PROCESSES

Lyapnev E.A. [✉], student, **Zhirakovsky R.A.**, student, **Timofeeva A.A.**, PhD in Economics Sciences

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation
E-mail: e.liapnev2004@yandex.ru*

The problem of practice-oriented training of engineers in the context of distance learning is considered. A solution is proposed based on the integration of specialized simulators of production processes that model processing, assembly, adjustment and diagnostics of equipment. An author's training model is described, combining a theoretical module, scenario tasks in a virtual environment and a digital control system. The expected effects include an increase in the level of professional competencies, safety and accessibility of engineering education.

Keywords: distance learning, engineering education, production process simulators, practice-oriented training, virtual simulators, digitalization of education

Цифровая трансформация машиностроения, связанная с внедрением киберфизических систем и технологий «Индустрии 4.0», формирует новый запрос к компетенциям инженерных кадров. Параллельно в образовательной сфере происходит масштабный переход к гибридным и дистанционным форматам, ускоренный глобальными вызовами. Однако при всей технологической оснащенности современных систем онлайн-обучения ключевой проблемой для инженерных специальностей, и в частности для машиностроения, остается дефицит практического компонента. Традиционные средства дистанционного образования эффективны для передачи теоретических знаний, но неспособны сформировать навыки работы с реальным производственным оборудованием, понимание технологических процессов «изнутри» и умение принимать решения в нестандартных ситуациях [1]. Это создает существенный разрыв между теоретической подготовкой и практической готовностью выпускника. Целью исследования является разработка и обоснование модели дистанционного обучения, преодолевающей этот разрыв путем внедрения симуляторов производственных процессов. Для ее достижения

поставлены задачи: выявить специфические ограничения дистанционного формата в машиностроительном образовании; классифицировать и оценить дидактический потенциал симуляторов; предложить модель их интеграции в учебный процесс; оценить эффективность и ограничения подхода.

Машиностроительное образование по своей сути является глубоко практико-ориентированным. Его ядро составляют не только фундаментальные знания в области механики, материаловедения и теории резания, но и формирование конкретных навыков: наладки станков, разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ, проведения контрольных операций, сборки сложных узлов. Эти навыки формируются через непосредственный сенсорный и моторный опыт, что изначально противоречит концепции классического дистанционного обучения, при котором учащийся дистанцируется от объекта изучения.

Ключевым ограничением выступает невозможность обеспечить безопасный, масштабируемый и контролируемый доступ к дорогостоящему и зачастую опасному оборудованию. Существующие видео и интерактивные материалы обеспечивают лишь пассивное наблюдение, не позволяя совершать действия, анализировать их последствия и учиться на ошибках. Особенно остро проблема проявляется при обучении действиям в нештатных и аварийных ситуациях, отработка которых в реальности недопустима. Это создает объективную потребность в инструменте, способном достоверно воспроизводить рабочую среду и физику процессов для активного взаимодействия. Таким инструментом являются симуляторы производственных процессов.

Симуляторы в образовании представляют собой программные или программно-аппаратные комплексы, имитирующие функционирование реальных систем. В машиностроении они эволюционировали от простых 2D-тренажеров для изучения кинематических схем до сложных виртуальных сред и цифровых двойников, учитывающих физику материала и инструмента. Для систематизации существующих решений предлагается классификация по уровню интерактивности и реализма, которая представлена в табл. 1. Каждый тип симулятора решает свои образовательные задачи: от ознакомления с интерфейсом станка до глубокого анализа влияния режимов резания на качество поверхности детали.

Таблица 1

Классификация симуляторов для обучения в машиностроении [2]

Тип симулятора	Примеры применения в ДО	Дидактический потенциал
2D-тренажеры и визуализаторы	Изучение систем ЧПУ, принципов работы автоматов, основ программирования	Формирование алгоритмического мышления, понимание логики процесса
3D-виртуальные тренажеры	Ознакомительные экскурсии по виртуальному цеху, отработка базовых операций сборки	Развитие пространственного воображения, наглядность изучения конструкций
Иммерсивные VR/AR-симуляторы	Отработка моторных навыков управления станком, выполнение сложных сборочных операций	Максимальное приближение к реальным условиям, формирование мышечной памяти
Симуляторы на основе цифровых двойников	Оптимизация технологических процессов, прогнозирование качества, исследование граничных режимов обработки	Глубокое понимание причинно-следственных связей, исследовательская деятельность

Дидактические возможности симуляторов проистекают из их ключевых свойств: безопасности, доступности и вариативности. Это позволяет организовать многократное повторение сложных операций, что является основой формирования устойчивого навыка. С помощью симуляторов становятся доступными для моделирования практически все ключевые производственные процессы: от токарной и фрезерной обработки и виртуальной сборки пресс-форм до логистики роботизированного участка и отработки действий при аварийной остановке конвейера.

На основе проведенного анализа предлагается многоуровневая модель интеграции симуляторов в дистанционный курс машиностроительного профиля. Модель носит циклический характер и состоит из четырех взаимосвязанных этапов:

- теоретико-ознакомительный модуль. Студенты в рамках системы дистанционного обучения изучают базовые принципы, конструкции и теоретические основы предстоящей технологической операции с использованием видеолекций, интерактивных презентаций и электронных конспектов;

- практикум в среде для симуляций. Обучающийся выполняет сценарное задание, сформулированное как конкретная производственная задача (например, «изготовить деталь по чертежу на виртуальном фрезерном центре»). Последовательно отрабатываются все технологические шаги: выбор и установка виртуального инструмента, настройка параметров, программирование, запуск симуляции;

- аналитико-коррекционный этап. Студент получает детализированный автоматизированный отчет о работе, преподаватель анализирует цифровой след и проводит целевые онлайн-консультации или групповые разборы типичных ошибок для коррекции дальнейших действий;

- контрольно-оценочный этап. Оценка результатов включает не только тестирование теоретических знаний, но и выполнение итогового комплексного задания в симуляторе, оцениваемого по объективным критериям: время выполнения, точность, отсутствие критических ошибок, рациональность режимов.

Роль преподавателя в такой модели трансформируется от транслятора информации к проектировщику образовательных траекторий, наставнику и модератору практической деятельности. Модель не противопоставляет дистанционный формат очному, а органично интегрирует их. Базовые навыки безопасно и эффективно отрабатываются дистанционно на симуляторах, что высвобождает время очных занятий для решения более комплексных, интеграционных задач на реальном оборудовании, для командной работы и развития «гибких» навыков [4].

Предварительная апробация элементов модели в учебном процессе позволяет говорить о ряде позитивных эффектов. Для их наглядного представления в табл. 2 приведены сравнительные данные контрольной группы. Образовательные результаты проявляются в росте глубины понимания технологических процессов, так как студент наблюдает за своими виртуальными действиями и влияет на результат. Это напрямую ведет к укреплению профессиональных компетенций – способности самостоятельно спланировать и выполнить технологическую операцию.

Наконец, игровая составляющая и немедленная визуальная обратная связь повышают вовлеченность в учебный процесс.

Ключевыми преимуществами подхода являются значительная экономия материальных ресурсов и безусловное повышение уровня безопасности.

Основные ограничения связаны с высокой стоимостью разработки или приобретения лицензий на качественные симуляторы, а также с техническими требованиями к компьютерному оборудованию обучающихся, особенно для VR-решений [5].

Таблица 2

Сравнительные показатели эффективности обучения [4, 5]

Критерий оценки	Традиционное ДО	ДО с симуляторами	Эффект
Средний балл за практические задания	68 %	87 %	+19 %
Глубина понимания процесса (по результатам опроса)	41 %	79 %	Удвоение
Уверенность в работе с реальным оборудованием	Низкая	Высокая	Качественное изменение
Вовлеченность	Средняя, падает к концу курса	Высокая, стабильная на протяжении курса	Повышение мотивации

Важно понимать, что даже самый совершенный симулятор не может полностью заменить тактильные ощущения и работу с реальным материалом, где присутствуют факторы вибрации, шума, неидеальности заготовки.

Проведенное исследование подтверждает, что традиционные дистанционные форматы, несмотря на свою развитость, не решают фундаментальную проблему практико-ориентированной подготовки в машиностроении, создавая существенный разрыв между теорией и реальными профессиональными навыками. В этом контексте симуляторы производственных процессов демонстрируют значительный педагогический потенциал, выступая инструментом, который обеспечивает безопасную, контролируемую и доступную среду для активного формирования инженерных компетенций.

Предлагаемая модель, построенная на цикличной интеграции теоретического модуля, практикума в симуляторе, аналитической обратной связи и цифровой оценки, в ходе апробации показала способность существенно повышать как объективные результаты обучения, так и субъективную уверенность студентов. Таким образом, наиболее перспективной представляется парадигма, в которой симуляторы рассматриваются не как замена, а как мощное и необходимое дополнение к очной практике, позволяющее перенести отработку базовых алгоритмов в виртуальную среду и тем самым повысить эффективность и безопасность последующей работы на реальном оборудовании, что полностью соответствует стратегическим задачам цифровой трансформации инженерного образования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вологин, А.Е. Характеристика процесса цифровой трансформации: новые возможности и вызовы, порождаемые цифровой трансформацией / А.Е. Вологин // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. – 2023. – № 1 (55). – С. 17–20. – EDN DVBMFJ.
2. Пикалев, Я.С. Анализ существующих симуляторов робототехнических систем / Я.С. Пикалев // Проблемы искусственного интеллекта. – 2017. – № 1 (4). – С. 51–65. – EDN YOJGTN.
3. Раджабов, М.А. Современные подходы к дистанционному обучению с использованием инновационных технологий / М.А. Раджабов, М.С.С. Абубакаров, А.В. Натальсон // Проблемы современного педагогического образования. – 2024. – № 85–4. – С. 344–347. – EDN LCGOYN.
4. Вяльцев, А.В. Роль симуляционных технологий в образовательном процессе по обеспечению технологической безопасности на производстве / А.В. Вяльцев // Вестник педагогических наук. – 2024. – № 8. – С. 33–39. – EDN UREHRO.
5. Пирогов, Д.А. Основные задачи обеспечения дистанционных форм обучения и их особенности при подготовке инженерных кадров / Д.А. Пирогов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2021. – № 4 (68). – С. 69–73. – ISSN 2413-5399.

ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ПЯТНА ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА НА ИЗМЕНЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

Малиновский Д.¹, аспирант, Шарков О.В.^{1,2✉}, профессор, д.т.н.

¹ Калининградский государственный технический университет,

г. Калининград, Российская Федерация

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта,

г. Калининград, Российская Федерация

E-mail: osharkov@kantiana.ru

Представлены расчетная схема и формулы для расчета приведенного коэффициента трения, реализующегося в барабанно-колодочном тормозе, когда участок распределения давления в контакте рабочих элементов смещен от своего номинального положения. Показано, что смещение участка фрикционного контакта от середины тормозной колодки к краю вызывает существенный нелинейный рост приведенного коэффициента трения.

Ключевые слова: барабанно-колодочный тормоз, приведенный коэффициент трения, закон распределения давления

EFFECT OF FRICTIONAL CONTACT PATCH DISPLACEMENT ON CHANGE IN TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF BRAKING DEVICES

Malinovskiy D.¹, PhD student, Sharkov O.V.^{1,2✉}, Professor, Grand PhD in Engineering Sciences

¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

E-mail: osharkov@kantiana.ru

The paper presents a calculation scheme and formulas for calculating the reduced coefficient of friction realized in a drum-shoe brake when the pressure distribution area in the contact of the working elements is shifted from its nominal position. It is shown that the displacement of the friction contact area from the middle of the brake pad to the edge causes a significant nonlinear increase in the reduced friction coefficient.

Keywords: drum-shoe brake, reduced friction coefficient, pressure distribution law

Барабанно-колодочные тормоза нашли широкое применение в транспортных средствах, где они хорошо вписываются в колесное пространство [1]. На характер распределения давления в контакте рабочих элементов барабанно-колодочных тормозов влияет значительное число факторов: величина и распределение износа; силовой режим торможения; деформация внешнего барабана; температурные условия и др. Влияние этих факторов может меняться не только за все время эксплуатации тормоза, но и в период одного торможения.

При различном сочетании названных факторов давление может распределяться по различным законам, из которых наибольшее применение в инженерных расчетах находят постоянный, косинусоидальный и синусоидальный [1, 2]. В свою очередь, закон распределения давления по контактирующим поверхностям тормозной колодки и барабана оказывает существенное влияние на триботехнические, прочностные, жесткостные, температурные и другие эксплуатационные характеристики тормоза.

При расчете этих характеристик обычно принимается допущение, что давление распределяется по выбранному закону непрерывно в пределах угла контакта, который принимается номинальным согласно конструктивным характеристикам тормоза. В реальных условиях вследствие неравномерного распределения износа по контактирующим поверхностям [3] пятно зоны контакта может смещаться от своего номинального положения.

Рассмотрим влияние смещения пятна фактического контакта на триботехническую характеристику тормоза – приведенный коэффициент трения. Основными конструктивными элементами барабанно-колодочного тормоза являются тормозной барабан 1, две симметрично расположенные тормозные колодки 2 и 3 с фрикционными накладками и разжимной кулачок 4. Рассмотрим случай, когда давление в зоне фрикционного пятна контакта изменяется по закону косинуса $p(\varphi) = p_{\max} \cos \varphi$ (рис. 1).

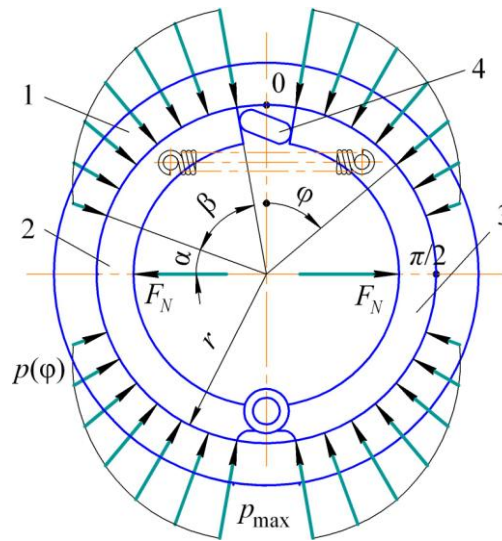


Рис. 1. Расчетная схема барабанно-колодочного тормоза

Силу нормального давления, действующую на одну тормозную колодку, можно определить как

$$F_N = 2 f r l \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha-\beta}^{\frac{\pi}{2}-\alpha} p(\varphi) \sin \varphi d\varphi, \quad (1)$$

где l – ширина тормозной колодки;
 r – радиус тормозной колодки;
 f – коэффициент трения в номинальном фрикционном контакте колодки и барабана;
 φ – угол, определяющий характер распределения давления на поверхности контакта;
 α – угол смещения пятна контакта;
 β – угол, определяющий участок расположения фактического пятна контакта;
 $p(\varphi)$ – функция, определяющая закон распределения давления в зоне пятна контакта.
 Силу трения, действующую на одну тормозную колодку, можно определить как

$$F_{TP} = 2 f r l \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha-\beta}^{\frac{\pi}{2}-\alpha} p(\varphi) d\varphi. \quad (2)$$

Приведенный коэффициент трения можно рассчитать по формуле

$$f_{\text{пр}} = \frac{F_{TP}}{F_N}. \quad (3)$$

Принимая допущение, что давление распределяется равномерно по ширине тормозной колодки, формулу (3) с учетом зависимостей (1) и (2) после преобразования можно записать в виде

$$f_{\text{пр}} = \frac{2 f}{\cos \alpha + \cos(\alpha + \beta)}. \quad (4)$$

Следует отметить, что при $\alpha = 0$, т. е. когда давление непрерывно распределяется в пределах угла контакта, формула (4) принимает вид, представленный в работе [2].

На рис. 2 показано влияние угла смещения пятна фрикционного контакта на величину приведенного коэффициента трения. Результаты получены по формуле (4) при условии $f = 0,3$ и $\alpha + \beta \leq \pi/2$.

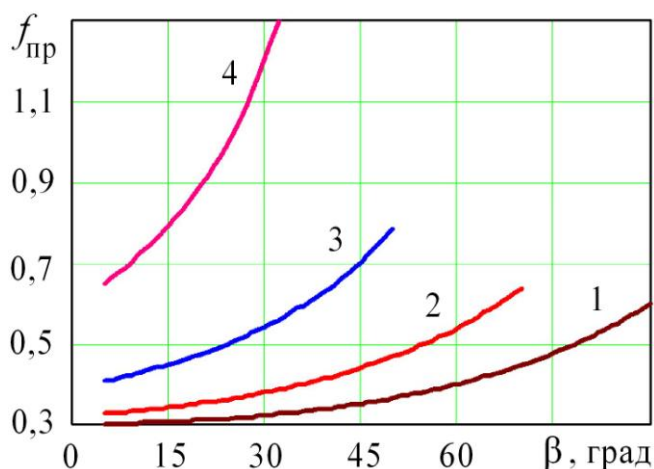


Рис. 2. Характер изменения приведенного коэффициента трения при смещении пятна фрикционного контакта на угол:
1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 20^\circ$; 3 – $\alpha = 40^\circ$; 4 – $\alpha = 60^\circ$

Как видно из полученных результатов, при увеличении угла смещения пятна фрикционного контакта от середины тормозной колодки к ее краю наблюдается существенный нелинейный рост приведенного коэффициента трения. При значительной величине смещения (α более 50°) приведенный коэффициент трения превышает величину, равную 1,0.

В источнике [4] показано, что при определенном сочетании материалов пар трения и условий их испытаний коэффициент трения может достигать до 1,23–1,63. Однако при этом наблюдается вырывание и налипание материала трущихся поверхностей. Следовательно, такие же явления будут происходить и в контакте рабочих поверхностей тормоза при значительном смещении пятна фрикционного контакта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тормозные устройства: справочник / Под общ. ред. М.П. Александрова. – Москва: Машиностроение, 1985. – 312 с.
2. Шарков, О.В. Определение приведенного коэффициента трения в контакте рабочих поверхностей барабанных тормозов / О.В. Шарков, С.И. Корягин // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 8. – С. 14–17.
3. Исследование интенсивности изнашивания тормозных механизмов, оборудованных системой принудительного охлаждения / П.А. Поляков, А.А. Голиков, Р.С. Тагиев, Е.А. Полякова, Н.А. Задаянчук // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2020. – № 9. – С. 12–16. – DOI: 10.26160/2309-8864-2020-9-12-16.
4. Крагельский, И.В. Коэффициенты трения: справочное пособие / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова. – Москва: Машгиз, 1962. – 218 с.

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОТОК ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ В S-KP-ТЕПЛООБМЕННИКЕ С ВНУТРЕННИМИ КОЛЬЦЕВЫМИ РЕБРАМИ

Мамбве М.М., аспирант

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

E-mail: musupilamambwe@mail.ru

Трубчатые теплообменники широко используются в различных отраслях промышленности благодаря своей эффективности, компактности и надежности. Цель данной статьи – исследовать характеристики теплопередачи и коэффициента трения в небольшом трубчатом S-образном теплообменнике с внутренними стенками, выполненными из полукруглых кольцевых ребер. Рабочей жидкостью служила вода, протекающая через внутреннюю круглую трубку.

Ключевые слова: число Рейнольдса, ламинарный поток, турбулентный поток, S-KP-теплообменник, фактор трения

TURBULENT FLOW OF HEAT TRANSFER AND PRESSURE LOSS IN AN S-KR HEAT EXCHANGER WITH INTERNAL ANNULAR FINS

Mambwe M.M., PhD student

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

E-mail: musupilamambwe@mail.ru

Tubular heat exchangers are widely used in various industries due to their efficiency, compactness, and reliability. The purpose of this article is to investigate the heat transfer and friction factor characteristics in a small tubular S-shaped heat exchanger with internal walls made of semicircular annular ribs. The working fluid was water, flowing through the inner circular tube.

Keywords: Reynolds number, laminar flow, turbulent flow, S-KR heat exchanger, friction factor

Теплообменники используются в самых разнообразных процессах преобразования и рекуперации тепловой энергии в различных промышленных, бытовых и коммерческих приложениях. К распространенным примерам относятся производство пара в энергетической промышленности, охлаждение в химической промышленности, рекуперация тепловой энергии, утилизация отработанного тепла и нагрев промышленных жидкостей, производственные процессы в сельскохозяйственной, фармацевтической промышленности. Понимание различных конструкций и типов теплообменников позволяет выбрать наиболее подходящий вариант для конкретных задач. Конструкция и характеристики каждого типа играют ключевую роль в эффективности и надежности оборудования. Повышение производительности теплообменника приводит к экономии энергии, затрат и материалов, необходимых для процесса теплообмена [1].

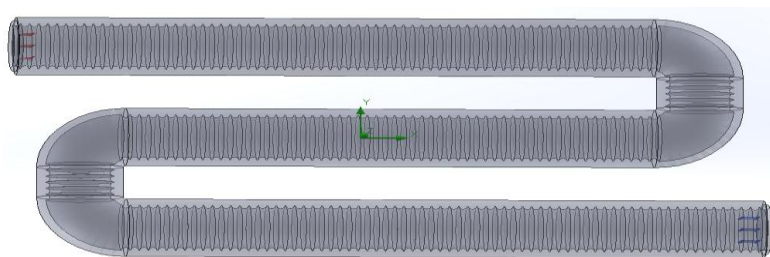


Рис. 1. Конструктивные конфигурации теплообменника S-KP

Тепло, поглощаемое холодным воздухом снаружи теплообменника, Q_X можно выразить следующим образом:

$$Q_X = \dot{m}_X c_{pX} (T_{XCH} - T_{XBH}), \quad (1)$$

где Q – рассеивание тепла;

$\dot{m}$ – массовый расход (кг/с);

c_p – удельная теплоемкость;

T – температура ($^{\circ}\text{C}$).

Тепло, подаваемое от горячей воды, Q_G можно определить как

$$Q_G = \dot{m}_G c_{pG} (T_{GCH} - T_{GBH}), \quad (2)$$

Индексы CH , BH , X и G обозначают внешний, внутренний, холодный и горячий соответственно.

Среднее значение теплопередачи, подаваемой и поглощенной обеими жидкостями, берется для расчета внутреннего конвективного коэффициента теплопередачи [4]:

$$Q_{CPD} = \frac{Q_X + Q_G}{2}, \quad (3)$$

$$Q_{CPD} = UA_{BH} \Delta T_{LMTD}, \quad (4)$$

где U – общий коэффициент теплопередачи ($\text{B}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$),

A – площадь поверхности трубки (м^2);

$$A_{BH} = \pi D_{BH} L, \quad (5)$$

где D – диаметр трубки (м),

L – длина трубки (м).

ΔT_{LMTD} – логарифмическая средняя разница температур ($^{\circ}\text{C}$):

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}, \quad (6)$$

$$\Delta T_1 = T_{GBH} - T_{XCH} \text{ и } \Delta T_2 = T_{GCH} - T_{XBH}.$$

Коэффициент теплопередачи со стороны трубки (Γ_{BH}) затем определяется (пренебрегая тепловым сопротивлением в стенке алюминиевой трубки) с помощью

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\Gamma_{CH}} + \frac{1}{\Gamma_{BH}}, \quad (7)$$

где коэффициент теплопередачи со стороны трубки (Γ_{BH}) был оценен с помощью корреляции Диттуса – Бельтера [3].

$$Nu_{BH} = \frac{\Gamma_{BH} D_{BH}}{k} = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3}, \quad (8)$$

где k – теплопроводность ($\text{B}/\text{м} \cdot \text{K}$).

$$\Gamma_{BH} = \frac{k Nu_{BH}}{D_{BH}}, \quad (9)$$

$$Nu_{CH} = \frac{\Gamma_{CH} D_G}{k}, \quad (10)$$

где D_G ($D_G = D$) – гидравлический диаметр трубы (м).

Локальная теплопроводность k жидкости рассчитывается по свойствам жидкости при локальной средней температуре объема жидкости. Число Рейнольдса основано на разной скорости расхода на входе в тестовый участок [2]:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}, \quad (11)$$

где μ – динамическая вязкость рабочей жидкости, в данном случае воды.
Коэффициент трения f можно записать как

$$f = \frac{\Delta P}{(\rho u^2 / 2)(L / D_f u)}, \quad (12)$$

где u – средняя скорость в трубке (м/с).

Все теплофизические свойства воды определяются при температуре полного объема воды. Общее отношение усиления определяется как отношение коэффициента усиления теплопередачи к коэффициенту трения при том же падении давления. Общий коэффициент усиления можно записать в виде

$$\left(\frac{Nu_{pe}}{Nu_{6-pe}} \right) = \left(\frac{f_{pe}}{f_{6-pe}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (13)$$

где Nu_{pe} , Nu_{6-pe} и f_{pe} – это числа Нуссельта и коэффициенты трения для конфигурации трубки с ребрами и без них соответственно.

Следует отметить, что фактического сбора данных тестовая установка проверялась с помощью экспериментов с обычной гладкой трубкой. Число Нуссельта, полученное на основе этих экспериментальных данных, было сравнено со значениями, полученными в результате корреляции Диттуса – Бельтера [3].

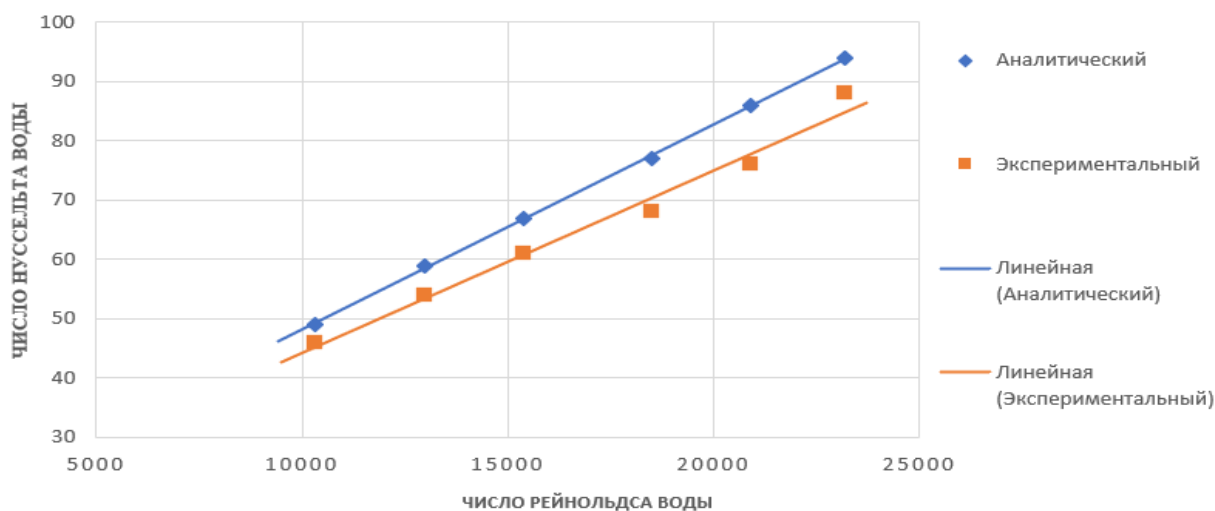


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и аналитических корреляций с гладкой трубкой

На рис. 2 результаты экспериментальной работы хорошо совпадают с доступной аналитической корреляцией в пределах $\pm 8\%$ по сравнению с числовой корреляцией Нуссельта Диттуса – Бельтера.

Экспериментальные результаты показывают, что число Нуссельта в ребристом S-KP с тремя разными расстояниями выше на 73, 76 и 78,8 % соответственно, чем у гладкого внутреннего S-KP. Увеличение числа Нуссельта также можно представить, вычисляя общий коэффициент усиления с помощью формулы (13).

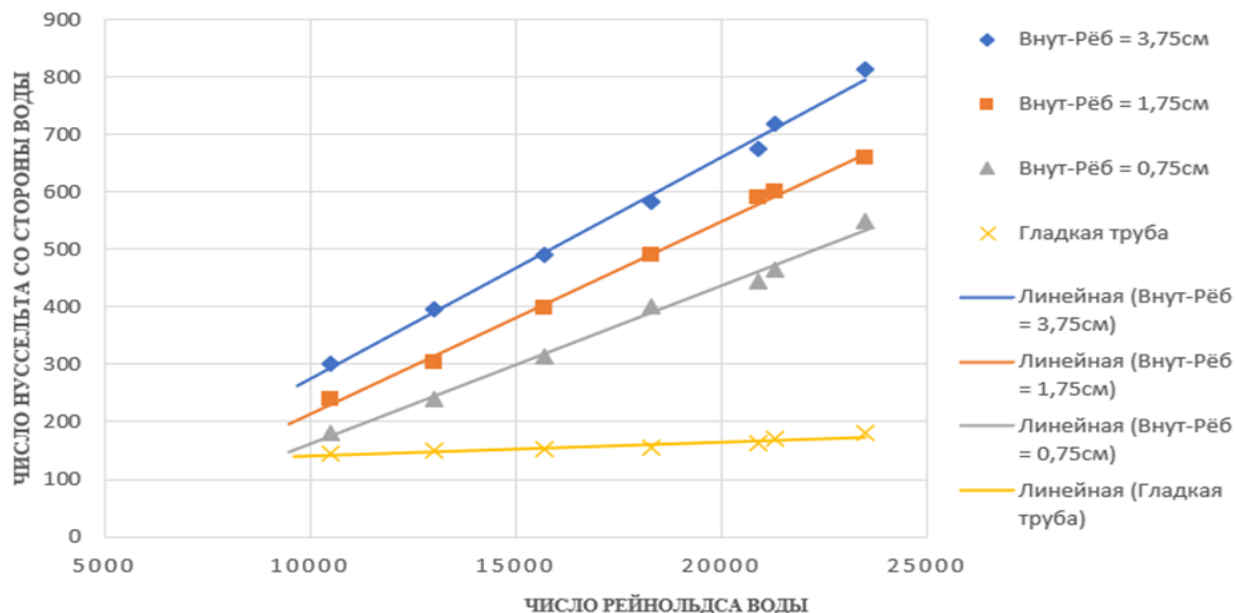


Рис. 3. Сравнение чисел Нуссельта со стороны воды для ребристого S-KP и гладкого S-KP

Усиление теплопередачи заметно при установке ребер на внешней поверхности внутренней трубы теплообменника. S-KP с внутренними ребрами обеспечивает более высокие показатели Нуссельта (более высокое рассеивание тепла), чем гладкая трубка. Среднее увеличение числа Нуссельта составляет около 96 % по сравнению с гладкой трубкой S-KP. Коэффициент трения уменьшается с приростом числа Рейнольдса, а коэффициент трения в ребристой трубке постепенно уменьшается с увеличением расстояния между двумя ребрами (3,75; 1,75; 0,75 см). В заключение следует отметить, что значительное повышение эффективности S-KP было обнаружено за счет установки плавников на внешней поверхности внутри трубы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скрыпник, А.Н. Гидравлическое сопротивление и теплоотдача труб с внутренним спиральным оребрением при однофазном течении теплоносителя: дис. ... канд. техн. наук. / А.Н. Скрыпник. – Казань, 2020. – 195 с.
2. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1992. – 671 с.
3. Инкропера, Ф. Введение в теплопередачу / Ф. Инкропера, П.Д. Девитт. – Нью-Йорк: John Wiley & Sons Inc, 1996. – Т. 3. – С. 104–118.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – 7-е изд. – Москва: Дрофа, 2003. – 840 с.

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Наговицын И.И. ✉, аспирант, Шильяев С.А., д.т.н., доцент

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,
г. Ижевск, Российская Федерация
E-mail: i-nagovitsyn@mail.ru

Рассмотрены практические аспекты повышения технологичности ответственных корпусных деталей центробежных насосов для газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на ранней стадии проектирования. В качестве объекта исследования выбран корпус насосной секции из состава агрегата НЦСГ-Е-10-630-А-Ш-УХЛ1. На основе анализа конструкторской документации и паспорта изделия проведена оценка технологичности, выявлены ключевые проблемные зоны: сложность формообразования внутренних каналов, разнотолщинность стенок, затрудненный доступ режущего инструмента к ответственным посадочным поверхностям. Предложен комплекс мероприятий на этапе конструкторско-технологического проектирования, включающий оптимизацию геометрии для литья, рационализацию схемы базирования при механической обработке и унификацию крепежных элементов. Реализация предложенных мер, оцененная с применением экспертного метода, позволяет прогнозировать снижение трудоемкости механической обработки на 18–22 % и уменьшение массы отливки на 4–6 % без ущерба для функциональных характеристик.

Ключевые слова: технологичность конструкции, газоперекачивающий агрегат (ГПА), центробежный насос, корпусная деталь, конструкторско-технологическое проектирование (КТП), литье, механическая обработка

ENHANCING THE MANUFACTURABILITY OF CASING PARTS FOR GAS TRANSMISSION UNITS AT THE DESIGN AND ENGINEERING STAGE

Nagovitsyn I.I. ✉, PhD student,
Shilyaev S.A., Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, Izhevsk, Russian Federation
E-mail: i-nagovitsyn@mail.ru

The paper considers practical aspects of improving the manufacturability of critical casing parts of centrifugal pumps for gas transmission units (GTU) at the early design stage. The pump casing of the unit НЦСГ-Е-10-630-А-Ш-УХЛ1 was chosen as the object of study. Based on the analysis of design documentation and the product passport, a manufacturability assessment was conducted, identifying key problem areas: complexity of forming internal channels, wall thickness variation, and difficult access of the cutting tool to critical seating surfaces. A set of measures at the design and engineering stage is proposed, including optimization of geometry for casting, rationalization of the basing scheme for machining, and unification of fasteners. The implementation of the proposed measures, evaluated using an expert method, predicts a reduction in the labor intensity of machining by 18–22 % and a decrease in casting mass by 4–6 % without compromising functional characteristics.

Keywords: design for manufacturability (DFM), gas transmission unit (GTU), centrifugal pump, casing part, design and engineering, casting, machining

Корпусные детали центробежных насосов, входящих в состав газоперекачивающих агрегатов (ГПА), являются основными несущими и герметизирующими элементами, работающими под значительным давлением (до 10 МПа, согласно паспорту НЦСГЕ.В.01.000 ПС).

Их изготовление, как правило, связано с энерго- и металлоемкими процессами литья и последующей сложной механической обработкой [1]. Традиционный подход, при котором вопросы технологии рассматриваются после окончательного утверждения конструкторской документации, зачастую приводит к необходимости применения дорогостоящих методов обработки и увеличению производственного цикла. В этой связи целенаправленное повышение технологичности на этапе конструкторско-технологического проектирования (КТП) приобретает решающее значение для снижения себестоимости и повышения конкурентоспособности продукции тяжелого машиностроения [2, 3].

Целью настоящей работы является разработка и практическая демонстрация методики повышения технологичности сложной корпусной детали на примере реального изделия – корпуса насосной секции агрегата НЦСГ-Е-10-630-А-Ш-УХЛ1.

Анализ объекта исследования и оценка исходной технологичности

В качестве объекта исследования выбран корпус насосной секции агрегата НЦСГ-Е-10-630-А-Ш-УХЛ1 производства ООО «НТЭ» (г. Москва). Основные исходные данные, полученные из паспорта изделия и анализа схемы:

1. Функция: формирование проточной части центробежного насоса, передача нагрузок от рабочего колеса, обеспечение герметичности.

2. Особенности конструкции: деталь имеет сложную пространственную форму с криволинейными внутренними каналами (спиральный отвод), множеством ребер жесткости и фланцевых соединений. Наличие глухих зон и разнотолщинных переходов.

3. Предполагаемый метод получения заготовки: литье (на что указывает маркировка материала фланцев – 09Г2С, характерная для сварных и литых конструкций).

Ключевые технологические проблемы, выявленные на этапе анализа КТП:

1. Для литья: значительная неравномерность толщин стенок основного канала и ребер жесткости, создающая риск возникновения литейных напряжений, коробления и усадочных раковин.

2. Для механической обработки: отсутствие явно выраженных технологических баз для последовательной обработки соосных отверстий под подшипниковые узлы (контролируемые размеры $\varnothing 1 = 31,5 \pm 0,3$, $\varnothing 3 = 59 \pm 0,3$ мм, согласно табл. 5 паспорта [4]). Сложная конфигурация фланцев затрудняет их обработку за одну установку.

3. Для сборки: большое разнообразие крепежных элементов (винты, шпонки различных типоразмеров согласно спецификации), требующее дополнительной логистики и увеличивающее время сборки.

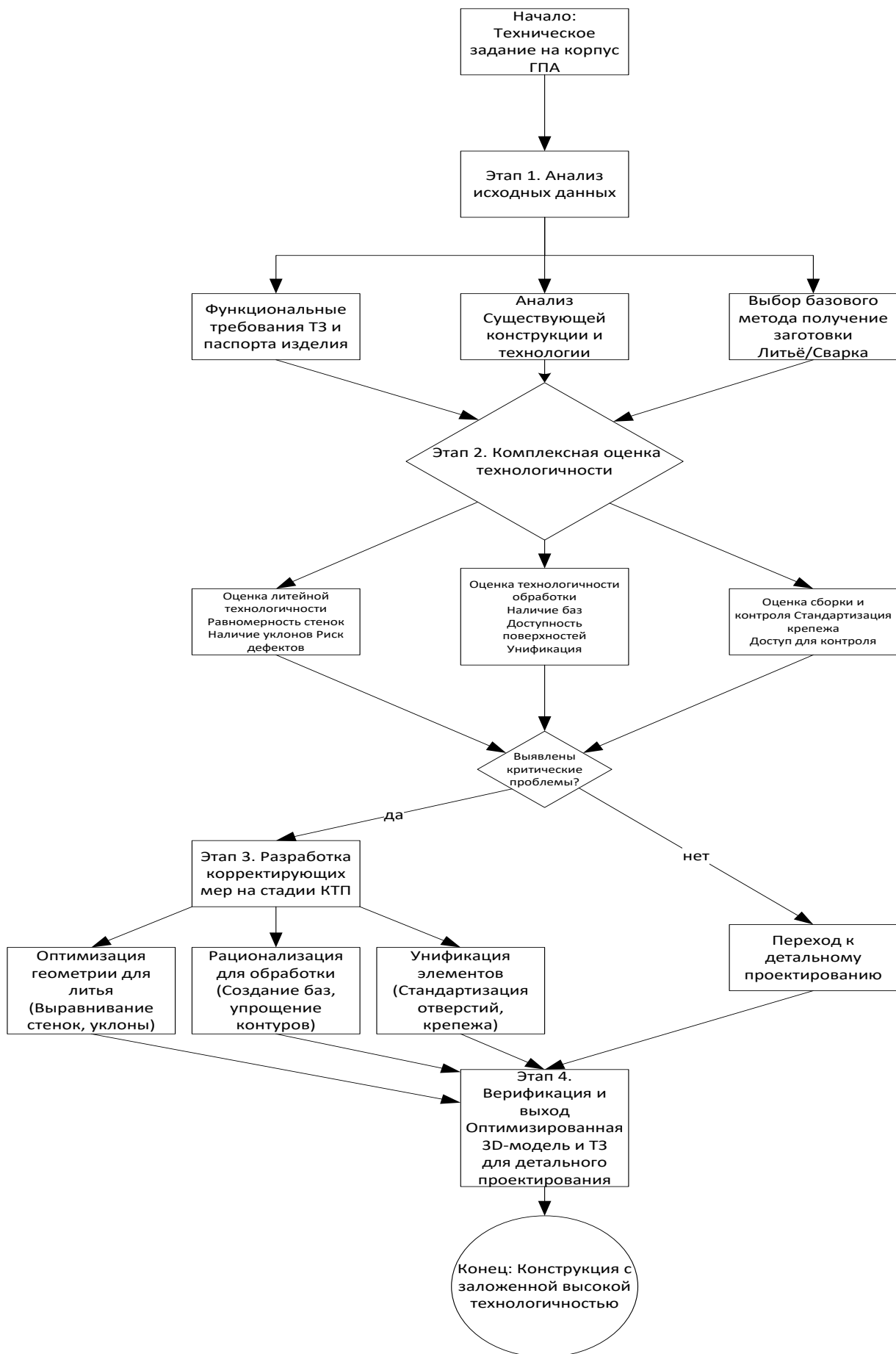
Количественная оценка по коэффициенту унификации (K_y) для крепежных элементов исходной конструкции составила приблизительно 0,35.

Предлагаемые меры по повышению технологичности на этапе КТП

Для систематизации работы на этапе конструкторско-технологического проектирования предлагается последовательный подход, блок-схема которого представлена на рисунке. Методология базируется на классических принципах оценки технологичности [2, 3, 5, 6] и современных подходах к проектированию литых деталей [7].

Предлагаемый подход начинается со сбора и анализа всех исходных данных (блоки этапа 1). На этапе 2 проводится структурированная оценка по трем ключевым направлениям: литейная технологичность, технологичность механической обработки, технологичность сборки и контроля

Если выявляются проблемы, на этапе 3 разрабатываются и применяются конкретные корректирующие меры непосредственно в конструкторской документации. Выходом процесса является верифицированная 3D-модель и техническое задание для последующих стадий, в которых уже заложены принципы высокой технологичности.



Блок-схема комплексного подхода к повышению технологичности корпусных деталей на этапе КТП

Предлагаемые меры для корпуса НЦСГ-Е-10-630-А-Ш-УХЛ1 (в соответствии с этапом 3 схемы)

Применительно к анализируемому корпусу насосной секции на этапе КТП предлагаются следующие конструктивные изменения, не влияющие на его эксплуатационные характеристики:

1. Оптимизация геометрии для литья (Блок Е1):

– выравнивание толщин стенок: перепроектирование переходов между основной стенкой спирального отвода и ребрами жесткости. Введение плавных галтелей радиусом R8-R12 вместо резких сопряжений. Это минимизирует концентрацию напряжений при кристаллизации металла и снижает риск брака [7];

– введение технологических уклонов: добавление минимальных уклонов (1–2°) на всех внутренних вертикальных стенках, не участвующих в формировании гидродинамического контура, для беспрепятственного извлечения модели из формы.

2. Рационализация для механической обработки (Блок Е2):

– создание явных технологических баз: на наружных неотчетливых плоскостях корпуса предлагается предусмотреть литейные приливы – технологические платики, которые будут использованы в качестве черновых и чистовых баз для обработки ответственных отверстий под подшипники ($\varnothing 31,5 \pm 0,3$, $\varnothing 59 \pm 0,3$ мм) и торцов фланцев;

– упрощение контура фланцев: переход от сложной криволинейной формы внешнего контура фланцев к простой октагональной, что позволяет вести обработку торца и отверстий за одну установку на горизонтально-фрезерном станке с ЧПУ;

– унификация элементов (Блок Е3);

– стандартизация крепежных резьбовых отверстий на всех фланцах под единый типоразмер (например, М16). Это позволяет использовать один набор оснастки и инструмента, сокращая номенклатуру и время наладки.

Оценка ожидаемой эффективности

Ожидаемый технико-экономический эффект от внедрения предложений, сформированных на этапе КТП, оценен экспертным путем и приведен в таблице.

Сравнительная оценка показателей технологичности корпуса

Показатель	Исходная конструкция	Оптимизированная конструкция (проект КТП)	Прогнозируемое изменение
Коэффициент унификации крепежа, K_y	~0,35	~0,75	Увеличение на > 100 %
Ориентировочная трудоемкость мех. обработки, у. е.	1,0 (база)	0,78 – 0,82	Снижение на 18–22 %
Риск брака при литье (коробление, раковины)	Высокий	Умеренный	Снижение
Масса отливки, у. е.	1,0 (база)	0,94–0,96	Снижение на 4–6 %
Количество различной оснастки	Большое	Сокращенное	Упрощение подготовки производства

Заключение

На практическом примере корпусной детали насоса ГПА НЦСГ-Е-10-630-А-Ш-УХЛ1 [4] показана эффективность раннего (на этапе КТП) анализа технологичности, основанного на системном подходе [1, 2, 6].

Предложенный комплекс инженерных решений – оптимизация литейной геометрии, введение технологических баз и унификация – направлен на устранение конкретных проблем, выявленных в конструкции, и носит практический характер.

Экспертная оценка демонстрирует значительный потенциал для снижения трудоемкости изготовления (до 22 %) и материалоемкости (до 6 %) за счет изменений, заложенных на стадии проектирования.

Разработанная методика применима для широкого класса корпусных деталей энергетического и насосного оборудования и может быть формализована в виде корпоративных стандартов КТП на машиностроительных предприятиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технологичность конструкций: справочник / А.М. Дальский, И.А. Артисюк [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2019. – 512 с.
2. Схиртладзе, А.Г. Технологические процессы в машиностроении: учебник / А.Г. Схиртладзе, В.Ю. Невзоров. – Москва: ИНФРА-М, 2020. – 640 с.
3. Шеховцева, Т.В. Технологичность конструкции деталей механизмов – важный параметр, определяющий технологию изготовления / Т.В. Шеховцева, Е.В. Шеховцева // Вестник РГТА им. П.А. Соловьева. – 2022. – № 3 (62). – С. 66–62. – EDN PYMDWX.
4. Паспорт изделия НЦСГЕ.В.01.000 ПС на агрегат электронасосный НЦСГ-Е-10-630-А-Ш-УХЛ1. – ООО «НТЭ», 2024.
5. Рагулин, В.Д. Автоматизированная оценка технологичности конструкций изделий / В.Д. Рагулин, Л.Г. Бокова // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 9-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Курск, 18–19 апреля 2019 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 287–291. – EDN MTMEZO.
6. Технологичность конструкций изделий: справочник / Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1990. – 768 с.
7. Campbell, J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design / J. Campbell. – 2nd ed. – Butterworth-Heinemann, 2015. – 1080 p.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Новиков В.А. , к.т.н., доцент, **Акопян А.А.**, ассистент, **Пашина Т.В.**, студент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: vladislav.novyi@mail.ru

Описано устройство для определения твердости горных пород методом царапания поликристаллической алмазной пластиной. Представлена методика подготовки образцов и проведения испытаний. Введен показатель твердости HPDC как отношение нормальной нагрузки к площади контакта. Сформулированы преимущества прибора: кинематическая аналогия с бурением, возможность профилирования твердости, низкая стоимость индентора и его долговечность за счет поворота режущей кромки. Определены направления модернизации, включая автоматизацию измерений и регистрацию усилия резания.

Ключевые слова: твердость горных пород, устройство для измерения твердости, метод царапания, скретч-тест, PDC-резец

DEVICE FOR DETERMINING HARDNESS OF ROCKS

Novikov V.A. , PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Akopyan A.A.**, assistant, **Pashina T.A.**, student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: vladislav.novyi@mail.ru

The article describes a device for determining the hardness of rocks by scratching with a polycrystalline diamond plate. A methodology for sample preparation and testing is presented. The HPDC hardness indicator is introduced as the ratio of normal load to contact area. The advantages of the device are formulated: kinematic analogy with drilling, the possibility of hardness profiling, low cost of the indenter and its durability due to the rotation of the cutting edge. Directions for modernization, including automation of measurements and registration of cutting force, are determined.

Keywords: rock hardness, hardness measuring device, scratch method, scratch test, PDC cutter

Определение твердости горных пород является одной из ключевых задач геомеханики, петрофизики и горного машиностроения. Данный показатель непосредственно влияет на выбор способа разрушения массива, прогнозирование износа бурового инструмента и оценку эффективности горных машин. Традиционные методы измерения твердости, такие как испытания по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу, разработанные преимущественно для металлических материалов, основаны на статическом вдавливании индентора правильной геометрической формы и последующем измерении геометрических параметров отпечатка. Несмотря на свою универсальность, данные методы обладают рядом ограничений применительно к горным породам: высокая чувствительность к качеству подготовки поверхности, необходимость использования дорогостоящих алмазных инденторов, сложность измерения микроотпечатков на гетерогенных структурах и, главное, принципиальное несоответствие физической модели испытания реальному механизму разрушения породы при бурении.

В этой связи актуальной научно-технической задачей является разработка специализированных устройств и методик, которые не просто адаптируют классические подходы к твердым хрупким средам, но и воспроизводят в лабораторных условиях кинематику и динамику реального процесса резания. Наиболее перспективным направлением признано использование в качестве индентора поликристаллических алмазных пластин PDC, монолитно спеченных с твердосплавной подложкой. Такие резцы являются штатным инструмен-

том современных буровых долот, а их применение в измерительной технике позволяет достичь двойного эффекта: с одной стороны, обеспечить физически корректное нагружение породы, с другой – получить практически значимый параметр твердости, пригодный для прогнозирования износа реального бурового инструмента.

Целью настоящей работы является описание конструкции, принципа действия и методики испытаний оригинального устройства для определения твердости горных пород, реализующего метод царапания поликристаллической алмазной пластиной.

С геометрической точки зрения PDC-резец (рис. 1) представляет собой цилиндрическое тело диаметром 13,3 мм с плоской рабочей фаской, ориентированной под углом к горизонтальной плоскости испытываемого образца.



Рис. 1. PDC-резец в матрице долота

Такая ориентация не является произвольной – она в точности соответствует штатному положению резца в буровом долоте, что позволяет рассматривать процесс царапания как лабораторную модель элементарного акта резания породы. В отличие от пирамиды Виккерса или конуса Роквелла, форма контакта PDC-пластины с образцом не является правильной геометрической фигурой, а представляет собой сложную пространственную область, образованную внедренным сегментом передней поверхности резца, участком конической фаски и фрагментом боковой цилиндрической поверхности. Данная особенность потребовала разработки специальной методики расчета площади контакта, однако одновременно обеспечила высокую адекватность нагружения реальным условиям бурения.

Существенным преимуществом предложенного индентора является его доступность и низкая стоимость по сравнению со стандартными алмазными наконечниками. Поликристаллические алмазные пластины являются серийно выпускаемыми изделиями, применяемыми в горной и нефтегазовой отрасли, что исключает необходимость изготовления штучных прецизионных инденторов. Более того, для целей измерения твердости допустимо использование резцов, уже отработавших свой ресурс в бурении, но сохранивших неповрежденные участки режущей кромки. Это не только снижает стоимость экспериментального оборудования, но и открывает возможность для создания методик экспресс-оценки состояния инструмента непосредственно в производственных условиях.

Принцип действия разработанного твердомера основан на реализации кинематической схемы, в которой неподвижно закрепленный резец взаимодействует с перемещающимся относительно него образцом горной породы. Данная схема принципиально отличается от традиционных испытательных машин статического вдавливания, где индентор внедряется в неподвижную поверхность исключительно по нормали, и приближает условия лабораторного эксперимента к реальному процессу бурения, при котором резец одновременно нагружен осевым усилием и совершает тангенциальное перемещение вдоль забоя. В разработанном устройстве образец породы, предварительно подготовленный и зафиксированный на ферромагнитной подложке, устанавливается в тиски, снабженные модифицированной рукояткой. Вращение рукоятки приводит к поступательному перемещению тисков в горизонтальной плоскости строго навстречу режущей кромке резца. Скорость перемещения задается оператором вручную.

и не является строго регламентированным параметром, поскольку физический механизм образования борозды при царапании хрупких материалов, как показано в экспериментальных исследованиях, не обнаруживает критической зависимости от скорости скольжения в диапазоне низких скоростей, доступных при ручном приводе.

Нормальное нагружение резца осуществляется путем установки тарированных грузов на упор, расположенный в верхней части штока. Шток свободно перемещается в вертикальном направлении внутри цилиндрической направляющей, закрепленной на кронштейне, что обеспечивает минимальное трение и высокую чувствительность системы к изменению глубины внедрения. Величина нормальной нагрузки выбирается из условия недопущения объемного раскалывания образца и для исследованных типов пород была установлена равной 200–300 Н. Важно отметить, что в отличие от классических методов измерения твердости, где нагрузка нормируется для достижения определенного размера отпечатка, в предложенной кинематической схеме нагрузка выступает независимым регулируемым параметром, а регистрируемой величиной является глубина внедрения резца и ширина образуемой борозды.

Описанная кинематическая схема обеспечивает устойчивое формирование прямолинейной борозды постоянной глубины при неизменной нормальной нагрузке. Ширина борозды, измеряемая после завершения испытания, однозначно связана с глубиной внедрения резца и механическими свойствами породы. Таким образом, кинематическая схема устройства не только обеспечивает воспроизводимое нагружение образца, но и позволяет наблюдать в лабораторных условиях элементы реального механизма разрушения породы при механическом бурении. Конструктивное исполнение разработанного твердомера (рис. 2) подчинено задаче обеспечения стабильного позиционирования индентора, точного дозирования нормальной нагрузки и плавного тангенциального перемещения образца при сохранении жесткости всей системы, необходимой для работы с крепкими высокоабразивными породами.

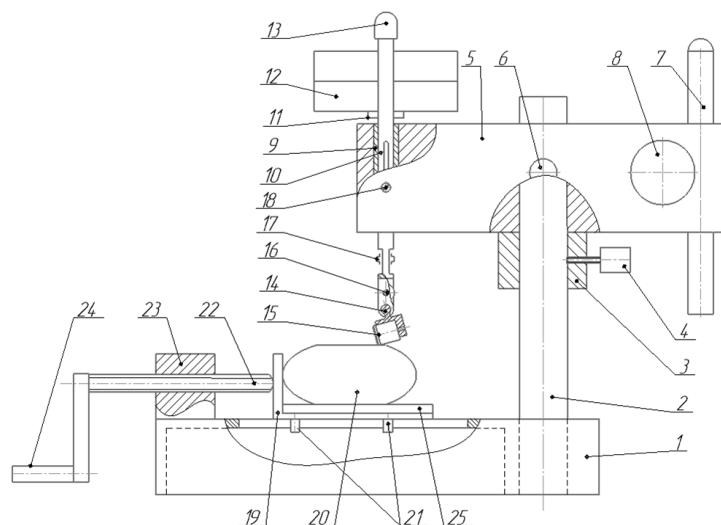


Рис. 2. Конструктивное исполнение твердомера

Вертикальная стойка (2) представляет собой цилиндрическую направляющую с прецизионно обработанной наружной поверхностью, на которой установлен кронштейн (18). Конструкция кронштейна допускает его свободное перемещение вдоль стойки с последующей фиксацией в требуемом положении посредством стопорного винта (4). В теле кронштейна выполнена цилиндрическая направляющая втулка (6), соосно с которой расположен шток (9). Шток изготовлен из закаленной стали, его рабочая поверхность подвергнута шлифованию для минимизации коэффициента трения при вертикальном перемещении. Верхняя часть штока оснащена упорной площадкой (11), предназначенной для установки сменных тарированных грузов (12). Рядом с упором размещена рукоятка (13), позволяющая оператору приподнимать шток при холостом ходе и плавно опускать его для ввода резца в контакт с образцом. Нижняя часть штока выполнена в виде фланца с посадочным гнездом под оправку резца (16).

Геометрия посадочного гнезда и конструкция оправки рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить строго фиксированное положение PDC-пластины относительно горизонтальной плоскости. Оправка снабжена прижимным винтом (17), исключаящим проворот резца под действием тангенциальной нагрузки и одновременно допускающим его поворот для обновления рабочего участка режущей кромки без извлечения из прибора.

Тиски (19), закрепленные на основании, предназначены для удержания образца породы в процессе царапания. Направляющие тисков (21) защищены от проникновения абразивной пыли, образующейся при царапании, эластичными гофрированными кожухами.

Все несущие элементы твердомера изготовлены из конструкционных сталей с последующей термообработкой ответственных поверхностей. Сопрягаемые детали работают по схеме «сталь по стали» с минимальными допусками, что гарантирует воспроизводимость условий нагружения и высокую точность позиционирования индентора при многократных циклах испытаний. Процедура измерения твердости на разработанном устройстве представляет собой строго регламентированную последовательность операций, обеспечивающую воспроизводимость условий нагружения и минимальное влияние субъективных факторов оператора на конечный результат. Исходным положением при подготовке к испытанию является состояние, при котором шток с закрепленным резцом поднят в крайнее верхнее положение, а тиски с установленным образцом отведены в исходную позицию, обеспечивающую свободный доступ к зоне контакта.

Установка PDC-резца в рабочее положение производится путем его размещения в посадочном гнезде оправки с последующей фиксацией прижимным винтом. Конструкция оправки обеспечивает однозначность базирования, однако после замены или поворота резца рекомендуется визуальный контроль правильности установки с использованием угломера или оптического шаблона. После фиксации резца шток опускается вращением рукоятки до момента касания режущей кромкой поверхности шлифа. Момент касания фиксируется визуально и по появлению легкого натяга при дальнейшем опускании штока. Положение кронштейна на вертикальной стойке регулируется таким образом, чтобы в момент касания шток находился в верхней трети своего рабочего хода, что обеспечивает достаточный резерв перемещения для внедрения резца в породу при нагружении.

С целью гарантированного формирования борозды требуемой глубины шток дополнительно опускается на 3–5 мм ниже уровня первоначального касания. Данная операция создает предварительный натяг системы и обеспечивает устойчивый контакт резца с породой сразу после приложения нормальной нагрузки.

После приложения нормальной нагрузки и стабилизации показаний индикатора, что занимает, как правило, не более 5–10 секунд и соответствует завершению фазы первичного вдавливания, производится перемещение образца относительно резца. Оператор равномерно вращает рукоятку тисков, сообщая образцу поступательное движение навстречу режущей кромке. Длина формируемой борозды должна составлять не менее 8–10 мм для обеспечения возможности многократных измерений ширины на различных участках и получения статистически надежных данных.

По завершении проходки образца на заданную длину вращение рукоятки прекращается, грузы снимаются с упорной площадки и шток с резцом поднимается в исходное положение. Тиски возвращаются в стартовую позицию.

Завершающая стадия экспериментального определения твердости методом царапания PDC-резцом заключается в инструментальном обмере геометрических параметров сформированной борозды и последующем вычислении показателя твердости HPDC на основе полученных данных. Первичным параметром, подлежащим непосредственному измерению, является ширина борозды, обозначаемая символом w . Данная величина представляет собой расстояние между боковыми границами канавки, образованной режущей кромкой резца при его тангенциальном перемещении под нагрузкой. Измерение ширины производится с использованием оптического микроскопа, оснащенного окуляр-микрометром либо цифровой камерой с возможностью компьютерной обработки изображения.

Глубина внедрения индентора h в процессе испытания фиксируется непосредственно микрометрическим индикатором часового типа с ценой деления 1 мкм. Нулевое положение индикатора выставляется в момент касания резцом поверхности неподвижного ненагруженного образца. При последующем приложении нормальной нагрузки и перемещении образца показания индикатора изменяются, отражая вертикальное перемещение штока, жестко связанного с резцом. Необходимо отметить, что регистрируемая таким образом величина представляет собой сумму собственно глубины внедрения резца в породу и упругих деформаций элементов конструкции прибора. Расчет площади контакта S индентора с испытываемым материалом является ключевым и наиболее сложным этапом методики, поскольку геометрия внедрения PDC-резца не описывается простыми аналитическими зависимостями, характерными для сферического, конического или пирамидального индентора.

Вычисление твердости по критерию HPDC производится по формуле, являющейся прямым аналогом классического определения твердости как отношения нормальной нагрузки к площади проекции отпечатка. Принципиальным отличием от традиционных методов является то, что площадь контакта определяется не после снятия нагрузки путем измерения остаточного отпечатка, а в процессе активного нагружения с учетом упругопластического деформирования и микроскалывания, характерных для хрупких геоматериалов. Единицей измерения HPDC принят мегапаскаль, что обеспечивает сопоставимость получаемых значений с данными других механических испытаний горных пород. Типичные значения HPDC для гранитов и кварцитов при глубине внедрения 5–10 мкм лежат в диапазоне 2–6 ГПа, что коррелирует с их прочностью при одноосном сжатии и твердостью по шкале Мооса.

При обработке экспериментальных данных неизбежно обнаруживается выраженная обратная зависимость вычисляемой твердости от глубины внедрения индентора: с увеличением h значения HPDC не остаются постоянными, а существенно снижаются. Данное явление, известное в литературе как эффект масштабирования или размерный эффект, не является следствием методической ошибки, а отражает фундаментальную особенность деформирования и разрушения хрупких гетерогенных материалов.

Таким образом, реализованная в разработанном твердомере измерительно-расчетная методика, базирующаяся на непосредственном обмере геометрических параметров борозды и апробированной геометрической модели контакта, позволяет перейти от качественных визуальных оценок сопротивления породы резанию к количественно измеряемому показателю твердости HPDC. Последний, несмотря на свою условность и зависимость от условий испытания, обладает высокой практической значимостью, поскольку непосредственно характеризует поведение породы при взаимодействии с реальным породоразрушающим инструментом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жукова, Н.Л. Методы определения твердости в микромасштабе / Н.Л. Жукова, В.А. Михеев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 3. – С. 55–60.

ТРИБОТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ «ЭФФЕКТА БЕЗЫЗНОСНОСТИ» ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ТРУЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МОБИЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Прокопенко А.К.^{1✉}, профессор, д.т.н., профессор, **Корнеев А.А.**¹, доцент, к.т.н., доцент,
Кещян Г.В.¹, доцент, к.э.н., доцент, **Еремеев С.В.**², генеральный директор,
Гапонов В.Г.², инженер

¹ *Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина,
г. Москва, Российская Федерация*

² *ООО НПЦ «ГРАНЬ», г. Москва, Российская Федерация
E-mail: prokopenko-ak@rguk.ru*

Представлены результаты повышения срока службы узлов трения машин, оснащенных двигателем внутреннего сгорания, путем применения металлоплакирующих триботехнологий, в основе которых лежит процесс нанесения металлодержащего покрытия из композиционного материала на трущиеся поверхности. Показана возможность формирования такого покрытия как в процессе изготовления или ремонта машины, так и при ее обкатке, а также в процессе эксплуатации. Приводятся результаты стендовых и эксплуатационных испытаний машин, оснащенных двигателями внутреннего сгорания. Во всех случаях отмечаются отсутствие побочных эффектов от применения металлоплакирующих триботехнологий и высокая эффективность их применения.

Ключевые слова: триботехнологии, износ, обкатка, двигатели внутреннего сгорания, узлы трения, покрытие из композиционного материала

TRIBOTECHNOLOGY BASED ON THE “WEAR-FREE EFFECT” TO INCREASE THE SERVICE LIFE OF RUBBING PARTS OF MACHINES AND MOBILE TECHNICAL EQUIPMENT WITH AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Prokopenko A.K.^{1✉}, Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor,
Korneev A.A.¹, Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Keshchyan G.V.¹, Associate Professor, PhD in Economic Sciences, Associate Professor,
Eremeev S.V.², General Director, **Gaponov V.G.**², engineer

¹ *Kosygin Russian State University, Moscow, Russian Federation*

² *LLC NPTs GRAN, Moscow, Russian Federation
E-mail: prokopenko-ak@rguk.ru*

The results of increasing the service life of friction units of machines equipped with an internal combustion engine by using metal-plating tribotechnologies based on the process of applying a metal-containing coating from a composite material on the rubbing surfaces are presented. The possibility of forming such a coating both during the manufacture or repair of a machine, and during its run-in, as well as during its operation, is shown. The results of bench and operational tests of machines equipped with internal combustion engines are presented. In all cases, there are no side effects from the use of metal-plating tribotechnologies, and their application is highly effective.

Keywords: tribotechnologies, wear, run-in, internal combustion engines, friction units, composite material coating

На современном этапе развития многие машины и мобильные технические средства приводятся в движение с помощью двигателей внутреннего сгорания. Автомобили стали самым распространенным транспортным средством, обеспечивающим доставку грузов и пе-

ревозку пассажиров. Подавляющее большинство транспортных средств приводится в движение бензиновыми или дизельными двигателями, от надежности которых зависит их работоспособность.

Опыт эксплуатации и ремонта автомобилей показывает, что очень часто они выходят из строя по причине износа трущихся деталей узлов и агрегатов. В двигателе внутреннего сгорания наиболее изнашиваемыми являются детали цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Ресурс большинства моделей автомобильных двигателей ограничивается износостойкостью сопряжений: «гильза цилиндров – верхнее компрессионное кольцо» и «шейка вала – вкладыш». Предельный износ является не единственной причиной, ограничивающей ресурс двигателя. От 10 до 40 % двигателей поступает в ремонт по причине задира в сопряжении «шейка коленчатого вала – вкладыш».

Задир в сопряжении возникает в результате действия ряда эксплуатационных и технологических факторов. Большое влияние на надежность подшипников скольжения коленчатого вала оказывает приработка. Это подтверждается тем фактом, что значительное количество отказов двигателей по причине задира в сопряжении «шейка коленчатого вала – вкладыш» происходит в начальный период эксплуатации, когда приработка еще не завершена. Повышенный износ наблюдается также у шестерен коробки передач, ведущего моста, в шаровых опорах, рулевых тягах, подшипниках ступиц передних и задних колес и карданной передачи.

Среди типов автомобильных двигателей внутреннего сгорания особое место занимают роторные двигатели, использующие вместо привычных поршней с шатунами вращающийся в полости корпуса ротор треугольного сечения. Такой двигатель достаточно компактный и легкий из-за отсутствия в нем коленчатого вала и газораспределительного механизма. При этом он обладает высокой мощностью.

Однако его массовое применение ограничивается повышенной токсичностью выхлопных газов, высоким расходом топлива и моторного масла, быстрым износом уплотнителей ротора, что приводит к нарушению герметичности образующихся при вращении ротора камер и резкому падению мощности.

Опыт эксплуатации технологических машин выявил, что долговечность их трущихся элементов в значительной степени определяется параметрами поверхностной зоны контактирующих деталей. Именно состояние этой зоны обуславливает устойчивость к износу, фрикционные характеристики, эффективность смазки, а также устойчивость к внешним факторам.

К ключевым параметрам поверхностного слоя относятся микротвердость, микрогеометрия, параметры шероховатости и другие характеристики. Оптимальные значения этих параметров для конкретных условий работы оборудования обычно определяются опытным путем.

Принципиально важно подобрать подходящую комбинацию материалов конструкции и смазочного материала для создания положительного градиента механических свойств, направленного к областям трения. При таком подходе пластические деформации будут сконцентрированы в тончайшем слое материала вблизи поверхности, что способствует продлению срока службы узла трения [4].

Изменение свойств поверхностного слоя деталей технологического оборудования возможно за счет применения триботехнологий. Эти методы основаны на модифицировании трущихся поверхностей в процессе фрикционного контакта в присутствии определенных химических веществ. При этом улучшаются такие характеристики поверхности, как твердость, коррозионная стойкость и износостойкость.

Многолетняя работа ученых и специалистов по эксплуатации механических систем позволила разработать новые триботехнологии, основанные на «эффекте безызносности», позволяющие повысить ресурс узлов и агрегатов машин и механизмов за счет формирования на трущихся поверхностях деталей тонкого (1–5 мкм) металлсодержащего покрытия из композиционного материала [3]. Формирование данного покрытия происходит из жидкой среды, в которой содержатся поверхностно-активные вещества и ионы таких металлов, как медь, никель, олово. В зависимости от ситуации сформировать покрытие на трущихся поверхно-

стях можно [4]: фрикционной обработкой в режиме металлоплакирования (во время технического обслуживания или ремонта оборудования); во время обкатки узлов оборудования в металлсодержащих обкаточных средах (после изготовления или текущего ремонта); в процессе эксплуатации введением в смазочные материалы специальных металлсодержащих присадок.

На процесс образования данных покрытий влияют такие факторы, как контактная нагрузка, линейная скорость в зоне контакта, шероховатость поверхности, температура в точке контакта, состав смазочного материала и др. [2]. Общая схема образования металлсодержащего покрытия из композиционного материала на рабочей поверхности детали при трении представлена на рисунке. В начальный период времени в зоне контакта в процессе трения происходит быстрая очистка поверхности от различных адсорбированных слоев (газы, вода, окисные пленки и др.). Это необходимо для того, чтобы адгезионная прочность между покрытием и подложкой была максимальной.

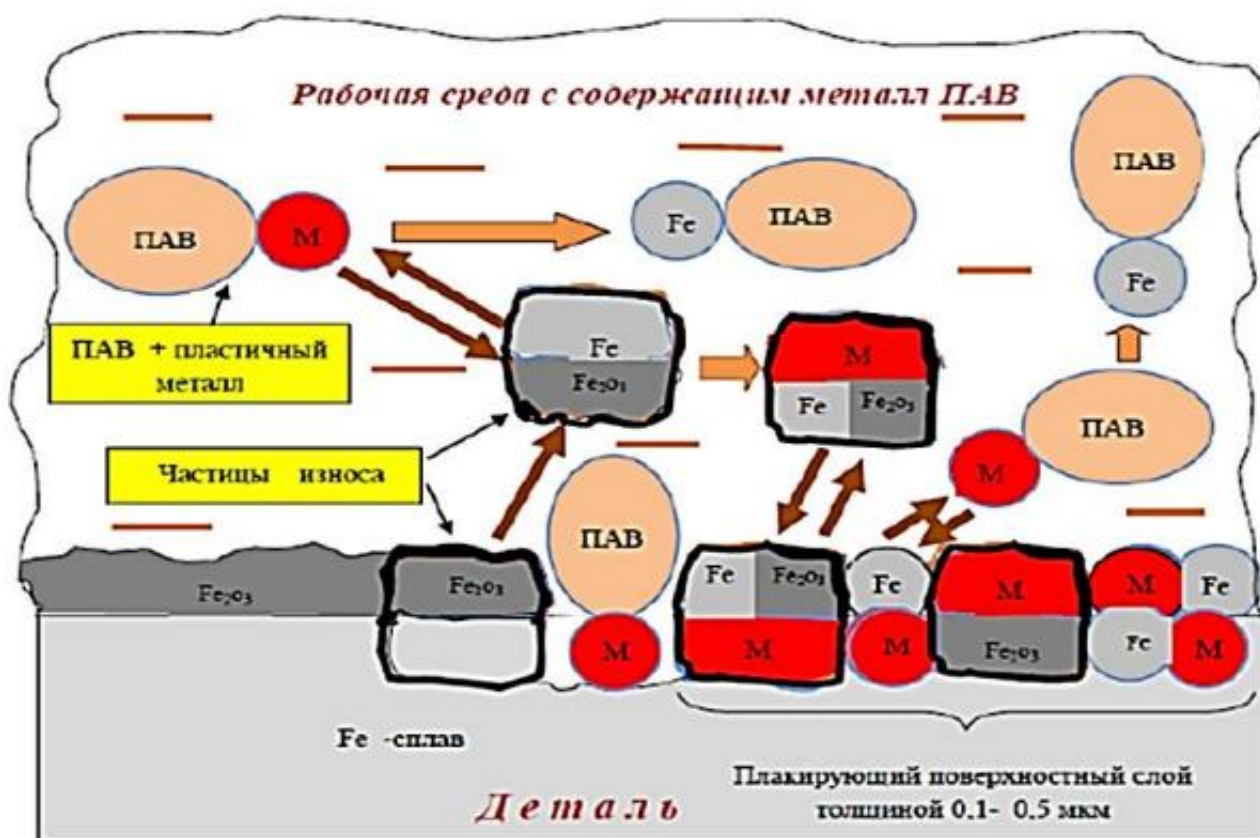


Схема образования металлсодержащего покрытия из композиционного материала на рабочей поверхности детали при трении

Кроме того, именно на ювенильной поверхности происходит химическая реакция замещения с образованием тонкой пленки композиционного покрытия. При этом ионы железа насыщают смазочную среду. Покрытие формируется не только на поверхностях трения, но и на частицах износа. Полученные биметаллические частицы под внешним воздействием диссоциируют в сформированное покрытие.

Особое значение имеют присутствующие в растворе поверхностно-активные вещества. Они адсорбируются на поверхность и проникают в приповерхностный слой, что кардинально меняет свойство покрытия. В частности, это приводит к снижению сопротивления сдвига и делает возможным осуществления наклепа (дислокации легко выходят на поверхность).

Таким образом, сформированная металлоплакирующая пленка вместе с частицами износа представляет собой квазиожиженный слой, который может многократно деформироваться без разрушений. Это приводит к снижению изнашивания поверхностей и силы трения.

Большой объем научных исследований в этом направлении в свое время был проведен в рамках выполнения Постановления Совета Министров СССР № 359 от 26.03.87г. по исследованию «эффекта безызносности» (научного открытия № 41) и водородного изнашивания (научного открытия № 378) на предприятиях Министерства бытового обслуживания РСФСР и АОЗТ «Мосавтопрогресс» (НПО Главмосавтотранс).

Исследования показали, что во всех случаях применения технологии нанесения металлосодержащего покрытия фрикционным способом отмечалось повышение износостойкости трущихся деталей в 1,5–2 раза, снижение потерь на трение до 30 %, особенно в начальный период работы, сокращение времени приработки.

Исследование поверхностей трения деталей с помощью электронных микроскопов показало, что особая структура покрытия способствует переносу содержащегося в покрытии металла на контртело и образованию поверхностного слоя с улучшенными триботехническими характеристиками.

При проведении обкатки узлов и агрегатов автомобиля, а также во время их эксплуатации в последнее время начали использоваться различного рода присадки [1]. Чаще всего положительный эффект от их применения снижается в результате отрицательного действия на резиновые уплотнения, фильтры, систему смазывания и другие детали.

В течение многих лет на автопредприятиях г. Москвы и России проходили испытания разработанной маслорастворимой металлосодержащей добавки к моторным и трансмиссионным маслам для проведения обкатки двигателей. Отличительной особенностью разработанной присадки является то, что она вводилась в десятых и сотых долях процентов, не изменяя при этом физико-химические характеристики смазочных материалов.

Стендовые испытания двигателя автомобиля ЗИЛ 130 в течение 50 часов показали, что при использовании присадок в малых концентрациях уменьшается износ шеек коленчатого вала на 39 % и гильз цилиндров на 23 %. Было отмечено устранение обычно имеющегося подплавления и сдвиг антифрикционного слоя шатунных вкладышей. Эксплуатационные испытания присадки проводились на автомобилях ГАЗ 24 в условиях городского движения. Пробег машин составил 50 тыс. км.

Проведенные спектральный и рентгеноспектральный анализ поверхностей трения работавших с присадками деталей показал наличие металлосодержащей пленки, основу которой составлял металл присадки. В процессе испытаний не было обнаружено отложений присадки на фильтрующих элементах масляной системы и смазочных каналах. Была отмечена тенденция к снижению расхода топлива в среднем на 3 %. Уменьшилось газовыделение и содержание СО в 1,2 раза, измеренное на минимальных оборотах холостого хода. Установлено уменьшение износа основных деталей двигателя в 1,25–4 раза и снижение шума в зубчатых передачах не менее чем на 7 ДБ.

В настоящее время ведется работа по повышению эффективности роторных двигателей за счет применения металлоплакирующих триботехнологий. Они основаны как на нанесении металлосодержащих и металлополимерных покрытий на рабочие поверхности пар трения, так и на введении специальных присадок в смазочные материалы. Полученные первые положительные результаты позволяют утверждать, что «эффект безызносности» реализуется не только в парах трения «металл – металл», но и «металл – керамика».

По заказу Тульского машиностроительного завода была проведена работа по совершенствованию обкатки одноцилиндровых дизельных двигателей ТМЗ для электрогенераторов, водяных помп и малых транспортных средств. Полученные результаты свидетельствуют о возможности сокращения времени обкатки двигателей до 4 раз при значительном улучшении других показателей [5].

На предприятиях по техническому обслуживанию и ремонту автотранспортных средств проходят испытания новых образцов металлоплакирующих присадок к современным смазочным материалам и гидравлическим жидкостям. Предварительные результаты полностью подтверждают полученные ранее данные о возможности существенного улучшения эксплуатационных показателей автотранспортных средств.

Таким образом, применение металлоплакирующих технологий, реализующих «эффект безызносности», приводит к увеличению срока службы трущихся деталей машин и мобильных технических средств с двигателем внутреннего сгорания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Балабанов, В.И. Автослесарь во флаконе (обкатка, обработка, профилактика, очистка, тюнинг, восстановление) / В.И. Балабанов. – Москва: АСТ, 2006. – 125 с.
2. Беляев, В.И. Разработка и исследование экологически чистых плакирующих технологий повышения срока службы оборудования кожевенно-обувных производств: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Беляев Виктор Иванович. – Москва, 2014. – 128 с.
3. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (Износ и безызносность) / Д.Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
4. Корнеев, А.А. Формирование модифицированного поверхностного слоя трущихся деталей технологического оборудования фрикционно-химическим способом / А.А. Корнеев, В.Л. Береснева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2025. – № 2. – С. 26–31.
5. Прокопенко, А.К. Триботехнические исследования по оптимизации режимов и улучшению качества приработки трущихся деталей двигателей внутреннего сгорания мобильных технических средств / А.К. Прокопенко, А.А. Корнеев, С.А. Попов // Пожарная и аварийная безопасность. – 2022. – № 4 (27). – С. 55–59.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ВИДА НАПОЛНИТЕЛЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Сысоева Л.П., старший преподаватель, **Левко В.А.** , профессор, д.т.н., доцент

*Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация
E-mail: levko@sibsau.ru*

Рассмотрены составы рабочих сред для обработки абразивным потоком деталей из алюминиевых сплавов. Описаны виды наполнителей рабочих сред. Даны рекомендации по выбору вида наполнителя для конкретных условий обработки.

Ключевые слова: рабочая среда, обработка потоком шариков, обработка абразивным потоком, алюминиевые сплавы

RECOMMENDATIONS FOR SELECTING THE TYPE OF MEDIA FILLER FOR ABRASIVE FLOW MACHINING OF PARTS MADE OF ALUMINUM ALLOYS

Syssoeva L.P., senior lecturer,
Levko V.A. , Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation
E-mail: levko@sibsau.ru*

This article examines the composition of media for abrasive flow machining of aluminum alloy parts. Types of media fillers are described. Recommendations for selecting the filler type for specific processing conditions are provided.

Keywords: media, ball flow machining, abrasive flow machining, aluminum alloys

В настоящее время существует проблема отделочно-упрочняющей обработки труднодоступных (закрытых) поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, в том числе термически неупрочняемых. Известно, что для обработки закрытых поверхностей проточных каналов все чаще применяют метод обработки абразивным потоком (abrasive flow machining (AFM)), разработанный в начале 70-х годов прошлого века [1].

Мировая практика показывает, что данная технология применяется для обработки труднодоступных поверхностей заготовок из различных материалов, в том числе и из алюминиевых сплавов [2]. Например, был обработан гребной винт из алюминиевого сплава Al6061 T6 (российский аналог АД33), в качестве наполнителя были применены зерна карбида кремния величиной 15 мкм при весовом соотношении с полимерной основой 1:1. При обработке абразивом больших размеров (63 и 250 мкм) на поверхности наблюдались царапины [3].

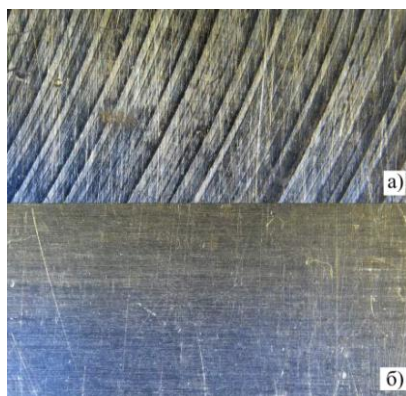
Абразивным потоком с наполнителем в виде зерен карбида кремния обрабатывались детали из алюминиевого сплава AlSi10Mg, изготовленные методом селективного лазерного сплавления [4], прямоугольные прямые волноводы из алюминиевого сплава AlSi7Mg0.6 [5], прямоугольные изогнутые волноводы из алюминиевого сплава AlSi10Mg [6]. При этом удалось полностью удалить дефектных слой и уменьшить шероховатости внутренней поверхности волновода от $Ra = 8\text{--}10$ мкм до $Ra = 0,2\text{--}1,3$ мкм.

Целью данной работы является повышение технологических возможностей обработки абразивным потоком в производстве деталей из алюминиевых сплавов за счет обоснованных рекомендаций по выбору вида наполнителя рабочей среды.

Основной проблемой обработки абразивным потоком деталей из алюминиевых сплавов является правильный выбор величины абразивных зерен, величины давления сдвига и количества циклов обработки. Обычно за 20 циклов обработки с поверхности алюминиевого образца может быть удалено 30–60 мкм металла. Однако в случае обработки зернами больших размеров при давлении более 10 МПа сьем металла может увеличиться до 300–500 мкм. При этом формируется шероховатость достаточно большой величины (до $Ra = 2,2\text{--}3,2$ мкм), имеющая направление потока рабочей среды. Также известно, что в результате обработки абразивным потоком в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения [4]. Для исключения микрорезания в процессе обработки абразивным потоком предложено вместо абразивных зерен использовать стальные шарики. Такой метод с потоком шариков был отнесен к отделочно-упрочняющей обработке и использован для изменения структуры поверхности образцов из термически неупрочняемого алюминиевого сплава АМг6. При обработке рабочей средой (каучук СКТ 33 %, шарики $\varnothing 1$ мм из стали ШХ-15 67 %) под давлением 10–12 МПа за 20 циклов получено уменьшение шероховатости поверхности образцов с 3,1–3,3 до $Ra\ 0,18\text{--}0,22$ мкм, увеличение микротвердости с 63–66 до 127–130 НВ, глубина упрочненного слоя до 14–17 мкм [7].

Таким образом, рабочие среды с наполнителем в виде зерен карбида кремния с величиной Ba от 62 (230) мкм до 420 (40) мкм рекомендуется использовать для обработки при невысоком качестве исходной поверхности: шероховатость произвольного направления величиной $Ra = 10\text{--}16$ мкм, наличие поверхностных дефектов в виде наплывов и частиц нерасплавленного порошка (для деталей, полученных селективным лазерным сплавлением); трещины, раковины, выпуклости (для отливок).

При регулировке весового содержания абразива в рабочей среде, величины давления сдвига (от 8 до 12 МПа) и количества циклов обработки (от 5 до 20) возможно полное удаление дефектного слоя с уменьшением шероховатости от исходного до $Ra = 0,2\text{--}1,3$ мкм. При этом произойдет упрочнение поверхностного слоя на 8–15 %. Величина припуска на обработку абразивным потоком должна быть не меньше 0,1 мм. Пример поверхности детали из алюминиевого сплава до и после обработки абразивным потоком показан на рисунке.



Поверхность образцов (увеличение 50х):
а – до обработки; б – после обработки

Для более существенного упрочнения поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов в качестве наполнителя рабочей среды рекомендуется применять стальные шарики. Регулируя весовое содержание шариков в рабочей среде и их диаметр (от 0,7 до 3 мм), величину давления сдвига (от 8 до 12 МПа) и количество циклов обработки (от 10 до 20), можно увеличить микротвердость в 2–2,5 раза и уменьшить шероховатость поверхности до $Ra = 0,18\text{--}0,22$ мкм.

Выбор наполнителя в виде абразивных зерен подразумевает в большей степени отделочную обработку с любым состоянием исходной поверхности. Выбор наполнителя в виде стальных шариков меняет характер обработки на отделочно-упрочняющий и предъявляет более высокие требования к исходному состоянию поверхности детали.

В результате данного исследования можно сделать следующие выводы. Вид наполнителя рабочей среды существенно влияет на характер обработки абразивным потоком деталей из алюминиевых сплавов. Использование абразивных зерен позволяет осуществлять отделочную обработку поверхности с низким качеством состояния поверхностного слоя. Применение стальных шариков меняет характер обработки с отделочного на отделочно-упрочняющий и позволяет повысить микротвердость поверхности в два раза. Таким образом, обработку абразивным потоком рекомендуется применять в качестве как отделочной, так и отделочно-упрочняющей для труднодоступных (закрытых) поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, в том числе термически неупрочняемых.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Patent US, no. 3521412. Method of honing by extruding / McCarty R.W. Published 21.07.1970.
2. Recent advancements in abrasive flow machining and abrasive materials: A review / Aneesh Goyal, Harvinder Singh, Rachin Goyal, Rajdeep Singh, Swarn Singh // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 56, part 5. – Pp. 3065–3072. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.109>
3. Abrasive flow finishing for surface roughness improvement of aluminum propeller: A case study / M.A. Manjunath, Prakash Vinod, N. Balashanmugam, M.R. Sankar // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 26, part 2. – Pp. 1113–1118. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.223>
4. Study on Improvement of Surface Roughness and Induced Residual Stress for Additively Manufactured Metal Parts by Abrasive Flow Machining / Can Peng, Youzhi Fu, Haibo Wei, Shicong Li, Xuanping Wang, Hang Gao // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 71. – Pp. 386–389. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.046>
5. Electromagnetic performance of Ti6Al4V and AlSi7Mg0,6 waveguides with laser beam, melting (LBM) produced and abrasive flow machining (AFM) finished internal surfaces / Mathieu Francois, Sangil Han, Frederic Segond, Corinne Dupuy, Mickael Rivette, Simon Turpauot, Mendi Mimouna, Ferdinando Salvatoe, Joel Rech and Patrice Peyre // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. – 2021. – Vol. 35. – No. 18. – Pp. 2510–2526. – URL: <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1954554>
6. Abrasive Flow Machining of the Internal Surfaces of 3D-Printed Curved Rectangular Waveguides / P.A. Ivanov, V.A. Levko, M.M. Mikhnev, E.V. Patraev // *Russian Engineering Research*. – 2023. Vol. 43. – No. 9. – Pp. 1106–1111. – DOI: 10.3103/S1068798X23090113
7. Improving the Surface Quality of Parts Made of Thermally Non-Hardenable Aluminum Alloy by Ball Flow Machining / V.A. Levko, L.P. Sysoeva, P.A. Ivanov [et al.] // *Russian Engineering Research*. – 2025. – Vol. 45. – No. 8. – Pp. 1117–1123. – DOI: 10.3103/S1068798X25701825.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ КАРБОНИЗАЦИИ ТОПЛИВА

Терлыч С.В.^{1,2✉}, к.т.н., Костоманов Д.А.¹, курсант 6 курса

¹ Херсонская государственная морская академия, г. Херсон, Российская Федерация

² Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,

г. Новороссийск, Российская Федерация

E-mail: rn6ay@yandex.ru

Предложен способ сравнения различных видов топлив путем введения коэффициента карбонизации. Выполнен сравнительный анализ топлив для морских судов и береговых объектов.

Ключевые слова: карбонизация топлива, парниковые газы, перспективы бескарбонового топлива

DETERMINATION OF THE DEGREE OF FUEL CARBONIZATION

Terlych S.V.^{1,2✉}, PhD in Engineering Sciences, Kostomanov D.A.¹, 6th year cadet

¹ Kherson State Maritime Academy, Kherson, Russian Federation

² Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

E-mail: rn6ay@yandex.ru

The method for comparing different types of fuels by introducing a carbonization coefficient has been proposed. A comparative analysis of fuels for marine vessels and coastal facilities has been performed.

Keywords: fuel carbonization, greenhouse gases, and prospects for carbon-free fuel

Достижение поставленных Международной морской организацией (ИМО) целей по сокращению выбросов парниковых газов (GHG) и декарбонизации топлива морских судов обуславливает необходимость оптимизации энергопотребления для морского транспорта и перехода от широкого использования ископаемого топлива к источникам энергии с нулевым или низким содержанием углерода. В исследовании предложен показатель, который позволяет оценить использованное топливо в аспекте его влияния на окружающую среду.

Как известно, самым распространенным топливом в наши дни являются углеводороды – природный газ метан и нефтепродукты. При сгорании углеводородов с отходными газами в атмосферу выбрасывается так называемый парниковый газ (ПГ). Для атмосферы Земли парниковыми газами принято считать углекислый газ (CO₂), озон (O₃), окислы азота (NO_x), метан (CH₄), хлорофторуглеводороды (C_nH_mCl_uF_v) и пары воды (H₂O↑). Основной составляющей ПГ, удерживающей тепло, которое образуется вследствие воздействия солнечных лучей, является CO₂.

Таким образом, выбросы парниковых газов, которые обусловлены деятельностью человека, а именно применением топлива, повышают глобальную температуру, что и является ключевой причиной изменения климата. В связи с этим в последнее время много внимания уделяется декарбонизации в энергетической сфере. Декарбонизация, с одной стороны, – это мероприятия, направленные на сокращения выбросов ПГ, с другой – процесс уменьшения выбросов CO₂ путем перехода от ископаемого топлива к безуглеродным источникам энергии [1]. Государства и компании после подписания Парижского климатического договора в 2015 г. о мерах по декарбонизации, пытаются уменьшить выбросы CO₂ или совсем избежать их. В то же время эти заявления не подтверждаются конкретными действиями и выбросы CO₂ увеличиваются ежегодно.

Согласно прогнозам, в 2030 году ожидается объем выбросов парниковых газов в количестве, которое приведет к повышению средней температуры на планете на 1,5 °C [2].

Таким образом, чрезвычайно важно иметь объективную оценку влияния разных видов топлива на окружающую среду вследствие выбросов CO_2 с помощью форматизированного показателя, например по отношению к экологически чистому топливу – водороду (H_2).

По определению, горение (англ. burning, нем. brennen) – это экзотермическая реакция окисления вещества, которая сопровождается выделением теплоты (пламени и/или свечения) и отходных газов. При повторном сгорании углеводородов в воздушном пространстве в состав выделенных газов входят азот, углекислый газ, водяные пары и определенное количество оксидов азота (при $t > 1300^\circ\text{C}$) [3], [4] и серы (S) при наличии ее как примеси [5]. Нейтрализация влияния на атмосферу оксидов азота и серы достигается известными способами. Каждый вид применяемого топлива по-разному влияет на карбонизацию окружающей среды. Как отмечалось, среди топлив доминируют углеводороды. Степень их карбонизации может быть определена зависимостью

$$\bar{C} = \frac{n_{\text{C}}}{n_{\text{C}} + n_{\text{H}_2} - 2n_{\text{O}_2}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

здесь n_{C} , n_{H_2} , n_{O_2} – количество атомов соответственно углерода, водорода, кислорода в молекуле топлива.

Зависимость (1) приемлема как для «чистых» углеводородов, так и для таких, которые содержат в молекуле кислород. В соответствии с этой зависимостью при полном сгорании топлива образуются углекислый газ (двуокись углерода – CO_2) и водяные пары ($\text{H}_2\text{O}\uparrow$).

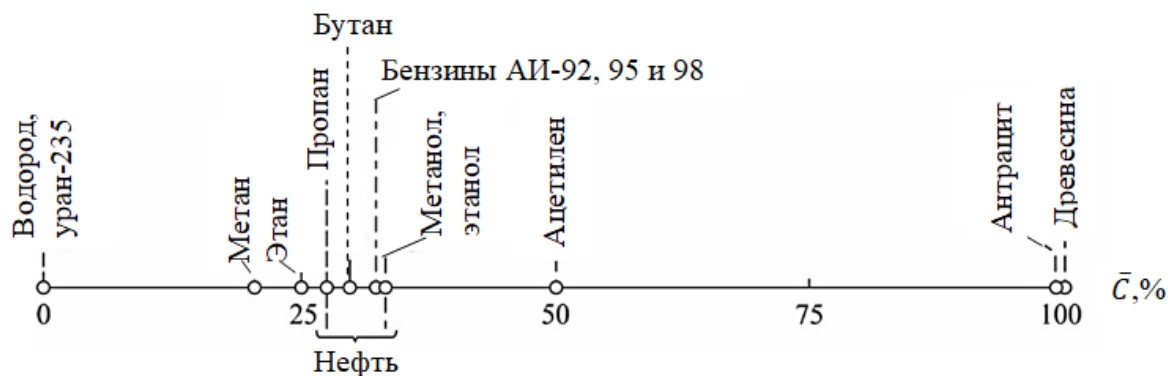
В таблице для характеристик видов топлива приведен состав молекул и рассчитанный по зависимости (1) уровень карбонизации. Кроме углеводородов, для сравнения показана степень карбонизации водорода, угля-антрацита и древесины.

Степень карбонизации топлива $\bar{C}$

Топливо	Химическая формула	Степень карбонизации $\bar{C}$, %
Водород	H_2	0
Метан	CH_4	20
Этан	C_2H_2	25
Пропан	C_3H_8	27
Бутан	C_4H_{10}	29
Высокоактивный бензин (92, 95, 98)	C_8H_{18}	31
Нефть (очищенная)	$\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	27–32
	C_nH_{2n}	33
Метанол	CH_3OH	33
Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	33
Ацетилен, бензин	C_2H_2 ; C_6H_6	50
Уголь (антрацит)	95 % – C	99
Древесина (целлюлоза)	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$	100

Очевидно, что чем выше уровень карбонизации топлива, тем больше выбросов углекислого газа. Для наглядности на рисунке приведена шкала степени карбонизации для конкретных углеводородов и древесины (целлюлозы), угля (антрацита) и водорода. Кроме того, на одном уровне с водородом расположен уран-235 как основа ядерного топлива для энергетических реакторов.

Следует отметить, что разница степени карбонизации углеводородов (природных газов, нефти, нефтепродуктов) незначительна: она лежит в пределах 20–33 %, за исключением ацетилена и бензина низкого качества, где она достигает 50 %.



Степень карбонизации различных видов топлива по отношению к водороду

Вывод: учет показателя карбонизации топлива будет способствовать целенаправленному использованию топлива уже на стадии проектных решений относительно энергетических объектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карбонизация и декарбонизация щелочных матричных топливных элементов [Электронный ресурс] / Д.Г. Кондратьев, В.И. Матренин, А.Т. Овчинников [и др.] // Электрохимическая энергетика. – 2009. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/karbonizatsiya-i-dekarbonizatsiya-schelochnyh-matrichnyh-toplivnyh-elementov> (дата обращения: 29.01.2026).
2. Кулеш, М.В. Исследование возможности производства из углей марки 3б высококалорийного кускового топлива в слоевом газификаторе с обращенным дутьем [Электронный ресурс] / М.В. Кулеш, С.Р. Исламов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 10 (17). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vozmozhnosti-proizvodstva-iz-ugley-marki-3b-vysokokaloriynogo-kuskovogo-topliva-v-sloevom-gazifikatore-s-obraschennym> (дата обращения: 29.01.2026).
3. Abbasi, T. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization / T. Abbasi, S.A. Abbasi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14. – No. 3. – Pp. 919–937.
4. Nitrogen Oxides (NO_x) – Regulation 13 [Electronic resource] // International Maritime Organization (IMO). – URL: [https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-\(nox\)-%E2%80%93regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-(nox)-%E2%80%93regulation-13.aspx)
5. Kažimírová, V. Biomass combustion emissions / V. Kažimírová, R. Opáth. – Research in Agricultural Engineering. – 2016. – Vol. 62. – Special Issue. – Pp. S61–S65.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА МАЛОРАСХОДНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ГИБРИДНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Фам Т.К.[✉], аспирант, Рассохин В.А., д.т.н., профессор

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: phamthanhquyet.kcd@gmail.com

Рассмотрены конструктивные и технологические особенности высокооборотных центробежных компрессоров для малорасходных газотурбинных гибридных двигателей. Показано, что повышение частоты вращения рабочего колеса позволяет обеспечить требуемую степень повышения давления, однако сопровождается ростом центробежных напряжений, ограничивающих режимы и ресурс. Обоснован выбор рабочего колеса закрытого типа и применение аддитивных технологий порошкового плавления в слое (PBF), обеспечивающих изготовление монолитных изделий сложной геометрии. Показано, что целесообразным является применение сплава Ti-6Al-4V для высокооборотных компрессорных колес по сочетанию прочности и удельной массы.

Ключевые слова: малорасходный газотурбинный двигатель, гибридная силовая установка, центробежный компрессор, аддитивное производство, Ti-6Al-4V

ANALYSIS OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR A CENTRIFUGAL COMPRESSOR OF A LOW-FLOW GAS TURBINE HYBRID ENGINE

Pham T.Q.[✉], PhD student, Rassokhin V.A., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: phamthanhquyet.kcd@gmail.com

The paper examines the structural and technological features of high-speed centrifugal compressors for low-flow gas turbine hybrid engines. It is shown that increasing the impeller rotational speed enables the required pressure ratio to be achieved at limited mass flow rates; however, it is accompanied by an increase in centrifugal stresses that limit operating regimes and service life. The selection of a closed-type impeller and the use of additive manufacturing technologies (PBF) for producing monolithic components with complex geometry are substantiated. It is demonstrated that the Ti-6Al-4V alloy represents a rational material choice for high-speed compressor impellers due to its favorable combination of strength and specific weight.

Keywords: Low-flow gas turbine engine, hybrid power unit, centrifugal compressor, additive manufacturing, Ti-6Al-4V titanium alloy

Малорасходные газотурбинные двигатели (МГТД) и гибридные силовые установки (ГСУ) на их основе рассматриваются как перспективная платформа для авиационных, транспортных и распределенных энергетических применений, где требуется высокая удельная мощность при ограниченных массогабаритных показателях [1]. Компрессор является одним из ключевых элементов МГТД: он определяет расход и степень повышения давления, а также влияет на компоновку и эксплуатационные характеристики ГСУ. Для двигателей малой и средней мощности широко применяются центробежные компрессоры (ЦК), обеспечивающие значительные степени повышения давления в одной ступени и работу на высоких частотах вращения (например, порядка 34 000 об/мин для 30 кВт МГТД) [2]. Обобщенная схема ступени ЦК с указанием основных элементов приведена на рис. 1.

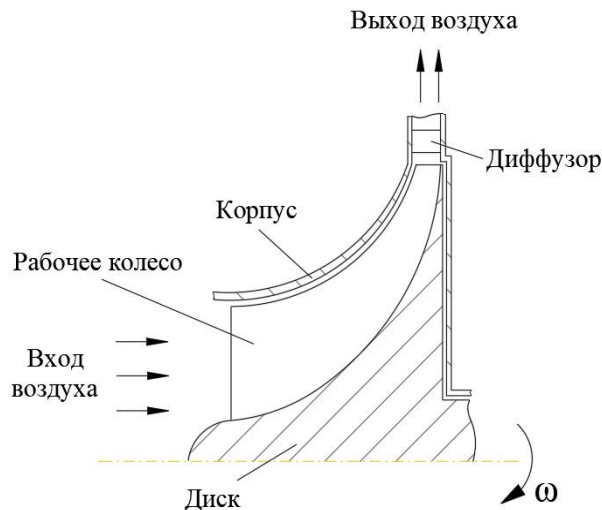


Рис. 1. Схема ступени центробежного компрессора

Одновременно с преимуществами высокооборотной компоновки возникает ключевое ограничение – рост центробежных напряжений в диске и лопатках рабочего колеса (РК), пропорциональный квадрату угловой скорости ($\sigma \sim \omega^2$). Нормированная зависимость центробежных напряжений от частоты вращения приведена на рис. 2. Согласно рисунку, увеличение частоты вращения даже на 20–30 % приводит к заметному росту напряжений и требует согласованного выбора геометрии, допусков и материала, а также учета прочностных ограничений совместно с газодинамическими при выборе проектной точки и конструктивной схемы РК.

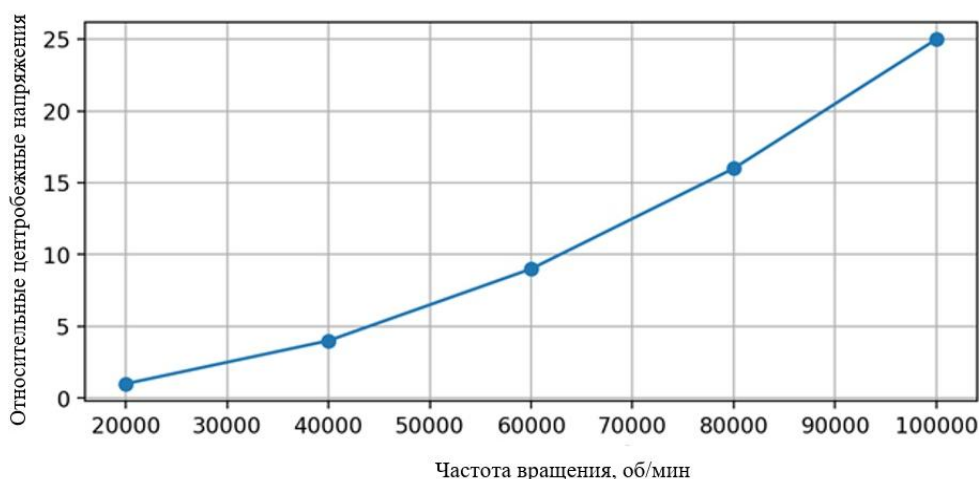


Рис. 2. Нормированная зависимость центробежных напряжений от частоты вращения

С точки зрения аэродинамики и эффективности ступени важным фактором являются утечки и вторичные течения в области периферийного зазора. Показано, что закрытые рабочие колеса обеспечивают более высокую эффективность за счет снижения утечек и улучшения структуры потока; влияние утечек в полостях кожуха также отражается на степени повышения давления и изэнтропическом КПД, поэтому их уменьшение увеличивает эффективность и надежность компрессора. Выбор закрытого РК повышает требования к технологии изготовления. Традиционные методы (литье, штамповка с последующей мехобработкой, сборка и сварка) ограничивают свободу формирования проточной части и повышают технологические риски при сложной пространственной геометрии. Технологии порошкового плавления в слое (PBF), включая SLM и EBM [3, 4], обеспечивают изготовление монолитных деталей сложной формы и применимы для ответственных компонентов; типовая технологическая цепочка с постобработкой показана на рис. 3. Сопоставление технологий изготовления РК приведено в табл. 1.

Сопоставление технологий изготовления рабочих колес

Технология	Свобода геометрии	Риски (дефекты/ограничения)	Постобработка	Применимость для закрытого РК
5-осевая мехобработка (из поковки/ прокат)	Средняя	Низкие, но ограничения по доступу инструмента	Высокая (обработка каналов, полировка)	Ограничена при сложной пространственной геометрии
Литье + мехобработка	Средняя	Поры, усадка; требуется контроль качества	Средняя (мехобработка, возможен ГИП (горячее изостатическое прессование))	Возможна, но сложна при тонких лопатках
Сборка/сварка элементов	Высокая	Высокие (швы, концентрации напряжений)	Высокая (контроль швов, термообработка)	Ограничена из-за надежности
Аддитивное PBF (SLM/EBM)	Высокая	Поры/шероховатость; требует регламента	Термообработка, ГИП (опционально), мехобработка базовых поверхностей, балансировка	Высокая, особенно для монолитного закрытого РК



Рис. 3. Типовая технологическая цепочка изготовления РК из Ti-6Al-4V (PBF) с постобработкой

Для высокооборотного РК определяющим является отношение прочности к плотности и стабильность свойств после изготовления и постобработки. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление σ_b определяются по результатам стандартных испытаний на растяжение. Значение $\sigma_{0,2}$ устанавливается методом смещения на 0,2 % по диаграмме «напряжение – деформация», а σ_b соответствует максимальному значению напряжения на экспериментальной кривой растяжения. В качестве базового материала для аддитивного изготовления РК широко рассматривается титановый сплав Ti-6Al-4V: для него приводятся плотность порядка 4,43 г/см³ и высокие значения предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и временного сопротивления (σ_b) после термообработки в аддитивном процессе (например, $\sigma_{0,2} \approx 1070$ МПа и $\sigma_b \approx 1230$ МПа в типовом паспорте материала). Для сопоставления в табл. 2 приведены также характеристики никелевого жаропрочного сплава IN718, стали 17-4PH и алюминиевого сплава AlSi10Mg по паспортным данным аддитивных материалов [5].

С учетом данных, приведенных в табл. 2, выбор ЦК с РК закрытого типа является обоснованным с позиции повышения эффективности ступени и снижения утечек. Технологическая реализуемость закрытого колеса может быть повышена за счет аддитивного производства по PBF-технологии с регламентированной постобработкой. Материал Ti-6Al-4V представляется рациональным выбором для высокооборотных колес вследствие высокого отношения прочности к плотности и промышленно доступных технологических цепочек изготовления и термообработки.

**Сопоставление паспортных свойств материалов, применяемых
в аддитивном производстве для рабочих колес компрессоров**

Материал (аддитивное изготовление)	Плотность, г/см ³	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Комментарий для РК компрессора
Ti-6Al-4V	≈ 4,43	≈ 1070 (после ТО)	≈ 1230 (после ТО)	Высокое σ/ρ , хорошая корроз. стойкость
IN718	≈ 8,19	≈ 1200 (после ТО)	≈ 1470 (после ТО)	Высокая прочность, но высокая масса
17-4PH	≈ 7,7 – 7,8	≈ 860–1235 (в зависимости от термообработки)	≈ 1310 – 1340	Высокая прочность, масса выше Ti
AlSi10Mg	≈ 2,65	≈ 200–270	≈ 310 – 460	Низкая масса, но ограниченная прочность

Заключение

Проанализированы конструктивные и технологические решения центробежного компрессора для малорасходного газотурбинного гибридного двигателя. Показано, что высокооборотная компоновка обеспечивает компактность и высокие удельные характеристики, однако требует учета прочностных ограничений, связанных с ростом центробежных напряжений. На основании современных данных об утечках и аэродинамике ступени обоснована целесообразность применения РК закрытого типа. Показано, что аддитивные технологии PBF (SLM/EBM) являются эффективным способом изготовления монолитных колес сложной геометрии при условии регламентированной постобработки. Сопоставление материалов показывает, что Ti-6Al-4V обеспечивает рациональный компромисс между прочностью и удельной массой, что подтверждает его перспективность для высокооборотных РК центробежных компрессоров малорасходного класса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Li, J. Micro gas turbine: Developments, applications, and key technologies on components / J. Li, Y. Li // Propulsion and Power Research. – 2023. – Vol. 12. – Iss. 1. – Pp. 1–43. – DOI: 10.1016/j.jppr.2023.01.002.
2. Experimental and numerical study on self-sustaining performance of a 30-kW micro gas turbine generator system during startup process / J. Guan [et al.] // Energy. – 2021. – Vol. 236. – P. 121468. – DOI: 10.1016/j.energy.2021.121468.
3. Additive manufacturing of titanium-based alloys- A review of methods, properties, challenges, and prospects / T.S. Tshepheha [et al.] // Heliyon. – 2022. – Vol. 8. – Iss. 3. – P. e09041. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09041.
4. A Review of Additive Manufacturing Techniques and Post-Processing for High-Temperature Titanium Alloys / B. Jin [et al.] // Metals. – 2023. – Vol. 13. – Iss. 8. – P. 1327. – DOI: 10.3390/met13081327.
5. MatWeb – Online Materials Information Resource [Online Database]. – URL: <https://www.matweb.com/index.aspx> (дата обращения: 02.02.2026).

Секция 3. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ПРОМЫШЛЕННОМ ДИЗАЙНЕ

УДК 622.23.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ДЕТОНАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ОПОРНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ДЕТАЛИ

Болдырева А.С. , аспирант, **Болдырев Е.С.**, студент, **Носов Н.В.**, д.т.н., профессор

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: a.s.boldyreva@mail.ru

Установлено, что уровень шероховатости, достигаемый при детонационном способе нанесения покрытия, существенно ниже значений, регламентированных техническими требованиями для PDC-долот. Данное обстоятельство является технологическим преимуществом в процессе бурения, поскольку снижение шероховатости способствует уменьшению интенсивности износа рабочих элементов долота. Кроме того, выявлена зависимость между толщиной формируемого покрытия и его эксплуатационными характеристиками: увеличение толщины слоя сопровождается ростом относительной опорной длины профиля, что, в свою очередь, обеспечивает повышение износостойкости покрытия.

Ключевые слова: долото PDC, детонационное покрытие, твердый сплав, износостойкость, шероховатость, качество поверхности, относительная опорная поверхность

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE DETONATION COATING THICKNESS ON THE RELATIVE BEARING SURFACE OF THE PART

Boldyreva A.S. , PhD student, **Boldyrev E.S.**, student,
Nosov N.V., Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: a.s.boldyreva@mail.ru

It has been established that the level of roughness achieved by this coating method is significantly lower than the values specified in the technical requirements for PDC bits. This is a technological advantage during the drilling process, as reducing the roughness helps to reduce the wear rate of the bit's working elements. Additionally, a relationship has been identified between the thickness of the coating and its performance characteristics: increasing the thickness of the layer leads to an increase in the relative support length of the profile, which in turn enhances the wear resistance of the coating.

Keywords: PDC chisel, detonation coating, hard alloy, wear resistance, roughness, surface quality, relative bearing surface

Качество поверхности является ключевым фактором, влияющим на ресурс изделий, который характеризуется такими показателями, как усталостная выносливость, износостойкость, герметичность узлов и стабильность контактной жесткости. Требуемые эксплуатационные свойства закладываются в ходе технологического цикла, где решающую роль играют режимы механической обработки (резание, шлифование), методы термического упрочнения и специфика формирования защитных покрытий [1, 2].

В настоящей работе рассматривается технологическое решение по повышению эксплуатационного ресурса бурового алмазного долота PDC за счет детонационного напыления из твердого сплава на рабочие поверхности долота. Постоянное взаимодействие с горной породой и работа в агрессивной среде приводит к преждевременному износу корпуса долота и резцов PDC из-за претерпевания высоких нагрузок, что влияет на эксплуатационную долговечность [3]. Поэтому долотные предприятия наносят на корпус долота износостойкие покрытия для обеспечения его нормальной работы.

На корпус долота методом ручной газопламенной наплавки [4] наносится наплавочный порошок, содержащий 60 % карбида вольфрама с никелем. Трудоемкость наплавки данным методом составляет 3–4 часа на 1 долото, а качество покрытия поверхности корпуса долота не соответствует техническим условиям (трещины, низкая шероховатость, наличие концентраторов напряжений и др.), что влияет на ресурс работы долота.

С целью улучшения качества поверхности и повышения эффективности работы долота предлагается технология нанесения покрытия из сплава Diamalloy 2004 (WC/Co 88/12 %) – аналога ВК12 – детонационным методом. Оценка качества поверхности проводится по следующим параметрам: адгезионные свойства, микротвердость, остаточные напряжения, микрогеометрия поверхности и др. Микрогеометрия поверхности оценивалась по параметрам шероховатости, замеренным в продольном и поперечном направлениях.

В работе исследовано влияние технологии нанесения детонационного покрытия на параметры шероховатости поверхности Ra , Rz , $Rmax$ и tp в зависимости от толщины покрытия и коэффициента перекрытия при его нанесении. Наибольшее распространение при нормировании износостойкости поверхности у нас и за рубежом получил параметр tp – относительная опорная поверхность.

Поскольку относительная опорная поверхность tp определяет фактическую площадь опоры, формируемую поверхностями долота и горной породы, данный параметр оказывает непосредственное влияние на интенсивность начального износа, уровень износостойкости и величину локальной пластической деформации в зоне контакта указанных поверхностей.

Величина относительной опорной поверхности определяется по формуле

$$tp = tp_1 \cdot tp_2, \quad (1)$$

где tp_1 – относительная опорная поверхность в продольном направлении;

tp_2 – относительная опорная поверхность в поперечном направлении.

Формирование покрытия осуществлялось с использованием детонационной установки CCDS2000. Процесс напыления проводился при нормальном угле атаки частиц (90°) к поверхности образца. Дистанция (расстояние от сопла до образца) напыления составляла 150 мм, а скорость частиц поддерживалась в интервале 90–100 м/с. Размер гранул порошка составлял 30–50 мкм, при этом пятно контакта соответствовало диаметру сопла и равнялось 20 мм.

Исследования проводились на образцах (пластинах) размером $80 \times 12 \times 2$ мм.

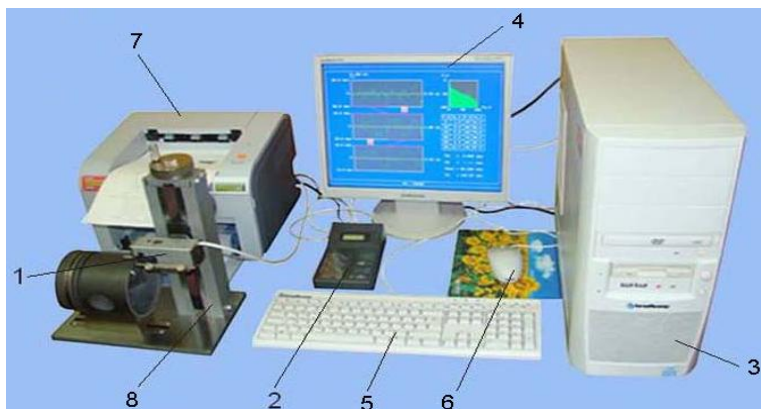
Перед нанесением покрытий поверхность подвергалась пескоструйной обработке. На поверхность образцов наносилось покрытие толщиной 0,1 мм; 0,2 мм; 0,3 мм.

Необходимая толщина покрытия достигается путем варьирования числа слоев, наносимых с перекрытием пятен контакта. Каждое пятно формировалось из 5 слоев, при этом суммарная толщина на пятне составляла 0,08–0,1 мм. Далее установка перемещалась на шаг, соответствующий диаметру пятна, с учетом коэффициентов перекрытия ($K_n = 1,0; 1,1; 1,2; 1,3$), после чего выполнялось напыление следующего пятна. Всего в пределах одного прохода формировалось 4 пятна. По окончании цикла пушка перемещалась в начальную позицию для нанесения очередного слоя.

После нанесения покрытия производилось определение параметров шероховатости на стационарном измерительном комплексе «Абрис ПМ7» (см. рисунок).

Исследование параметров шероховатости проводилось на 4 образцах. Измерения осуществлялись до и после обработки в двух перпендикулярных направлениях (базовая длина – 2,5 мм). Схема измерений предусматривала 5 замеров на каждое направление, таким образом, для одного образца выполнялось 25 замеров. Средние значения параметров Ra , Rz , $Rmax$, Sm , tp_1 и tp_2 приведены в табл. 1 и 2.

Требования технических условий: шероховатость корпуса долота $Ra \leq 12,5$ мкм; шероховатость поверхности после пескоструйной обработки перед напылением $Ra \leq 3,5$ мкм. Как следует из анализа экспериментальных данных, формирование детонационного покрытия приводит к росту параметра Ra с исходного уровня 1,2–1,5 мкм до 3,5 мкм.



Внешний вид стационарного измерительного комплекса «Абрис ПМ7»:
1 – первичный преобразователь, 2 – отсчетное устройство, 3 – системный блок,
4 – монитор, 5 – клавиатура, 6 – мышь, 7 – печатающее устройство, 8 – стойка приборная

Таблица 1

Средние параметров шероховатости поверхности в продольном направлении

Параметры шероховатости	Толщина покрытия, мм			
	без покрытия	0,1	0,2	0,3
Ra , мкм	1,2336	3,4764	3,2796	3,499
Rz , мкм	7,0214	15,782	15,6036	15,737
$Rmax$, мкм	9,027	23,4126	21,7958	21,1112
tp_1 , %, при $p = 25$ %	11,6	8,4	8,8	19,2

Таблица 2

Средние параметров шероховатости поверхности в поперечном направлении

Параметры шероховатости	Толщина покрытия, мм			
	без покрытия	0,1	0,2	0,3
Ra , мкм	1,3828	2,8118	3,433	3,4272
Rz , мкм	7,5398	13,9796	15,2962	16,3362
$Rmax$, мкм	9,694	19,3482	20,1996	23,2868
tp_2 , %, при $p = 25$ %	13,8	8,4	12,6	12,8

При этом увеличение толщины нанесенного слоя в диапазоне от 0,1 до 0,3 мм не оказывает существенного влияния на высотные характеристики поверхности. Определяющим фактором, влияющим на состояние поверхности, является относительная опорная поверхность, вычисляемая по формуле (1). Соответствующие значения данного параметра, полученные после послойного нанесения покрытия, представлены в табл. 3. Согласно расчетным данным, слой толщиной 0,1 мм демонстрирует снижение относительной опорной поверхности tp в 2,3 раза, что является признаком повышенной поверхностной пористости. При доведении толщины покрытия до 0,2 мм происходит уплотнение структуры, однако значение tp остается ниже исходного. Формирование слоя толщиной 0,3 мм обеспечивает увеличение tp в 1,6 раза по сравнению с исходным уровнем. Полученная поверхность характеризуется более высокими эксплуатационными свойствами.

Таблица 3

Средние параметры относительной опорной площади поверхности

Параметр опорной поверхности	Толщина покрытия, мм			
	без покрытия	0,1	0,2	0,3
Продольное направление tp_1 , %	11,6	8,4	8,8	19,2
Поперечное направление, tp_2 , %	13,8	8,4	12,6	12,8
Общее tp , % при $p = 25$ %	1,6	0,7	1,1	2,5

В результате проведенных исследований установлена следующая закономерность: при увеличении толщины формируемого слоя с 0,1 до 0,3 мм происходит рост относительной опорной поверхности tr (при уровне сечения $p = 25\%$) приблизительно в 3,5 раза. Данный факт следует рассматривать как положительный эффект, свидетельствующий о повышении качества формируемого покрытия.

Обобщая результаты исследования поверхностей, сформированных детонационным напылением, можно сделать следующие выводы. Установлено, что шероховатость покрытий, полученных данным методом, существенно ниже значений, регламентированных техническими требованиями для долот PDC. Данное обстоятельство является преимуществом в процессе бурения, поскольку пониженная шероховатость способствует снижению интенсивности изнашивания рабочих элементов долота. Кроме того, выявлена закономерность: с увеличением толщины наносимого слоя наблюдается рост относительной опорной длины профиля, что свидетельствует о повышении износостойкости покрытия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (Госзадания) FMRW-2025-0052.

The work was carried out with the framework of the government order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FMRW-2025-0052).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – Москва: Машиностроение, 2000. – 320 с.
2. Клевцов, Г.В. Влияние поверхностной обработки на микрорельеф и структурные изменения материала в поверхностном слое / Г.В. Клевцов, О.А. Фролов, Н.А. Клевцова // Фундаментальные исследования. – 2005. – № 4. – С. 71–73.
3. Приходько, В.М. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография / В.М. Приходько, И.А. Медеяев, Д.С. Фатюхин. – Москва: МАДИ, 2015. – 264 с.
4. Болдырева, А.С. Анализ материалов, применяемых при нанесении покрытий детонационным методом на корпус алмазного долота / А.С. Болдырева // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. – 2023. – Т. 25, № 4–2 (114). – С. 233–237.

МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ С УЧЕТОМ ИЗНАШИВАНИЯ

Бразжникова А.М., старший преподаватель

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: brazhnikova_98@mail.ru

Представлена методика комплексного моделирования динамики роликовых подшипников, учитывающая упругогидродинамическое трение с тепловыми эффектами, износ контактирующих поверхностей и усталостную долговечность сепаратора. Методика позволяет оптимизировать конструкцию подшипников, обеспечивая минимальные нагрузки, тепловыделение и гарантированный ресурс. Применима для автоматизированного проектирования ответственных узлов, включая газотурбинную технику.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, роликовые подшипники, упруго-гидродинамическое трение, износ поверхностей, усталостная долговечность, динамический анализ

METHODOLOGY FOR COMPUTER SIMULATION OF ROLLER BEARING DYNAMICS WITH ACCOUNT FOR WEAR

Brazhnikova A.M., senior lecturer

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: brazhnikova_98@mail.ru

A methodology for comprehensive simulation of roller bearing dynamics is presented. It accounts for elastohydrodynamic friction with thermal effects, wear of contacting surfaces, and fatigue life of the cage. The methodology enables bearing design optimization, ensuring minimal loads, heat generation, and guaranteed service life. It is applicable for computer-aided design of critical components, including gas turbine machinery.

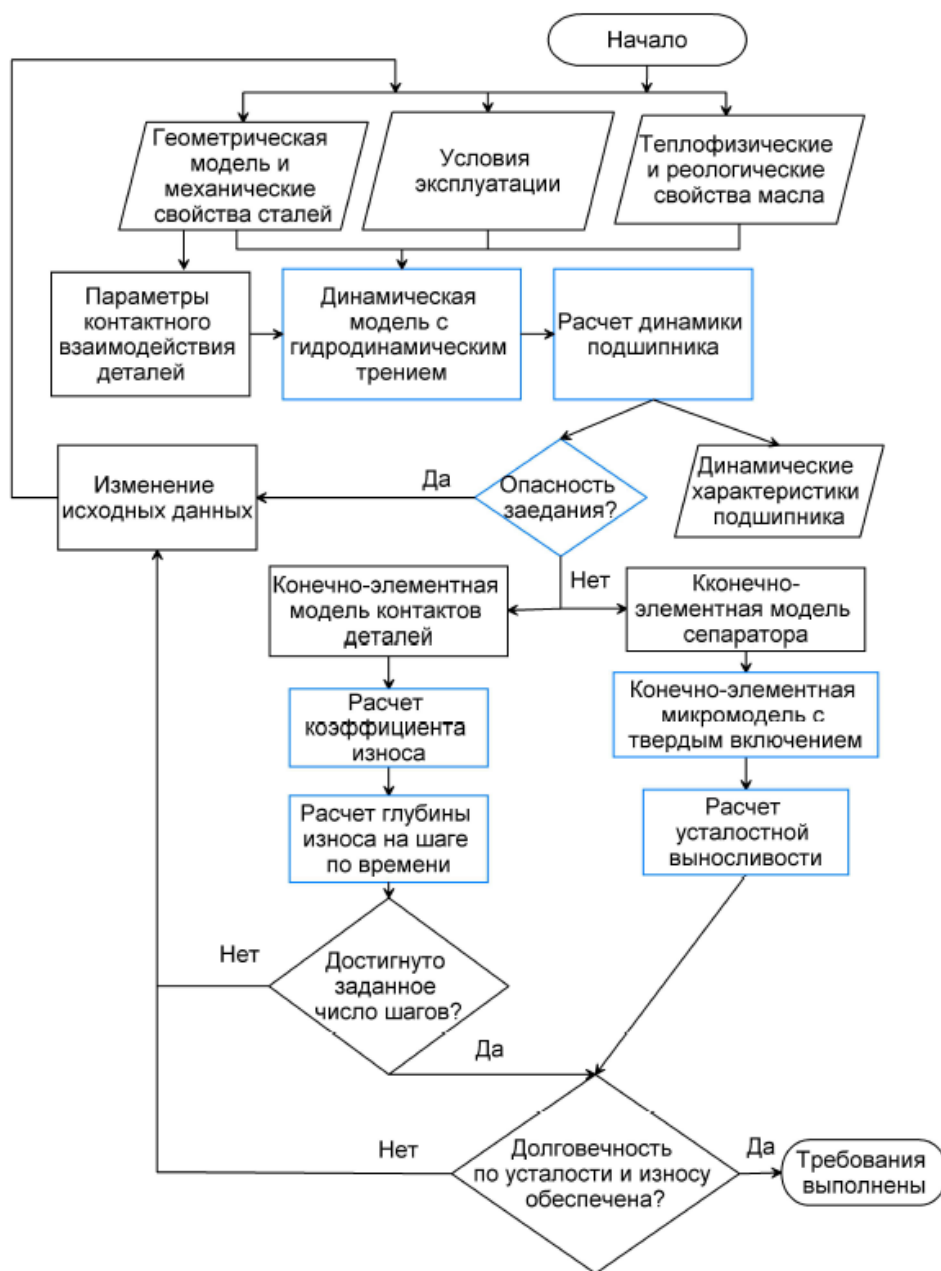
Keywords: computer simulation, roller bearings, elastohydrodynamic friction, surface wear, fatigue life, dynamic analysis

Целью применения методики является обеспечение требуемой долговечности роликовых подшипников на основе комплексного моделирования динамики и связанных с ней процессов, протекающих при эксплуатации в конкретной опоре.

Методика реализует воспроизведение движения всех элементов подшипника в пространственной динамической модели с гидродинамическими контактными условиями. В методику введены три новые ключевые компоненты: а) модель упруго-гидродинамического трения с тепловыми эффектами, обеспечивающая точное определение коэффициента трения и возможность возникновения заедания; б) модель расчета износа контактирующих поверхностей подшипника; в) модель оценки усталостной долговечности сепаратора. Шесть степеней свободы деталей позволяют наиболее полно описать их движение, учесть влияние всех параметров внутренней геометрии, включая углы перекоса и смещения колец, роликов, сепаратора, зазоры и другие.

Путем варьирования исходных параметров в допустимых диапазонах методика позволяет выявлять оптимальные конструктивные решения, обеспечивающие минимальные внутренние нагрузки, плавность вращения, минимальное тепловыделение, достаточную толщину масляной пленки и минимальное относительное скольжение при гарантированной долговечности по контактной усталости, износу и прочности сепаратора.

Структурно-функциональная схема разработанной методики компьютерного моделирования динамики роликовых подшипников с учетом изнашивания представлена на рисунке. Голубой контур отмечает этапы, по которым получены новые результаты: а) включение модели упругогидродинамического трения с учетом саморазогрева масляной пленки, обеспечивающей корректный учет условий контактного взаимодействия и оценку возможности заедания; б) расчет износа рабочих поверхностей; в) оценка усталостной выносливости сепаратора.



Структурно-функциональная схема разработанной методики компьютерного моделирования динамики роликовых подшипников с учетом изнашивания

Достоверность результатов моделирования определяется точностью исходных данных, которые делятся на три основные группы: условия эксплуатации, параметры конструкции подшипника и свойства масла.

Алгоритм расчета, реализованный по блок-схеме, представленной на рисунке, построен как система последовательных решений с обратными связями. Он обеспечивает автоматический переход между состояниями подшипника – от определения кинематики и гидродинамического трения до оценки износа и усталости сепаратора.

Основная логика включает следующие этапы:

1. Инициализация модели – ввод исходных данных, геометрии, материалов, свойств смазки и начальных зазоров.
2. Динамическое моделирование – расчет перемещений, скоростей, контактных сил и коэффициентов трения [1, 2, 3].
3. Проверка на заедание ($s < s_{cr}$) – если условие не выполняется, процесс возвращается к заданию измененных исходных данных.
4. Цикл расчета износа – если $s < s_{cr}$, переход к расчету износа по Арчарду. После расчета износа обновляется геометрия и выполняется повторный цикл динамического анализа.
5. Цикл расчета усталости сепаратора – параллельный анализ накопления усталостных повреждений; при $D \geq 1$ – вывод о разрушении.
6. Переходные проверки – при изменении геометрии или зазоров выполняется повторный расчет параметра масляной пленки и повторная оценка s_{cr} .
7. Верификация – при выполнении всех критериев устойчивости и долговечности формируется заключение о ресурсе и рекомендациях.

Таким образом, расчет ведется циклически с обратной связью: *геометрия, материалы, условия эксплуатации* → *нагрузки* → *трение* → *износ* → *новая геометрия или новый материал или новые условия эксплуатации* → *повторный расчет*.

Разработанная методика представляет собой завершенный алгоритм инженерного расчета динамики роликовых подшипников с учетом трения, износа и усталости сепаратора. Она обеспечивает комплексную оценку эксплуатационной надежности и пригодна для автоматизированного проектирования и оптимизации подшипников газотурбинных и других механизмов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Muraki, M. Molecular structure of synthetic hydrocarbon oils and their rheological properties governing traction characteristics / M. Muraki // Tribology International. – 1987. – Vol. 20. – No. 6. – Pp. 347–354.
2. Kumar, P. Lubrication Regimes: Point Contacts / P. Kumar, M.M. Khonsari; Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung (eds) // Springer: New York. – 2013. – Pp. 2116–2121.
3. Houpert, L. Piezoviscous-rigid rolling and sliding traction forces, application: the rolling element – cage pocket contact / L. Houpert // Journal of Tribology. – 1987. – Vol. 109. – No. 2. – Pp. 363–370.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА ВИБРОПРОЧНОСТЬ КАБИН ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Вильданов А.Г.^{1✉}, начальник отдела агрегатов и систем, Демьянов Д.Н.², к.т.н., доцент

¹ ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Российская Федерация

² Казанский (Приволжский) федеральный университет,

г. Набережные Челны, Российская Федерация

E-mail: adel.vildanov@mail.ru

Разработана модель на основе логистической регрессии, позволяющая прогнозировать результаты испытаний на вибропрочность кабин грузовых автомобилей. Входными данными являются массогабаритные характеристики кабины, параметры виброускорения и длительность проведения испытаний, а выходными – вероятность успешного прохождения испытания и информация о наиболее вероятных местах появления разрушений. Проведено обучение разработанной модели на экспериментальных данных, полученных для автомобилей КАМАЗ семейства К5, при этом анализ количественных метрик показал высокое качество бинарной классификации. Результаты работы планируется использовать для совершенствования процесса проведения испытаний на вибропрочность.

Ключевые слова: грузовой автомобиль, испытания на вибропрочность, прогнозирование, машинное обучение

PREDICTION OF VIBRATION RESISTANCE TEST RESULTS FOR TRUCK CABINS USING MACHINE LEARNING METHODS

Vildanov A.G.^{1✉}, Head of the Department of Assemblies and Systems,

Demyanov D.N.², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ “KAMAZ” PJSC, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

² Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

E-mail: adel.vildanov@mail.ru

A model based on logistic regression has been developed that makes it possible to predict the results of tests on the vibration resistance of truck cabins. The input data are the weight and size characteristics of the cabin, vibration acceleration parameters and the duration of the tests, and the output data is the probability of successful completion of the test and information about the most likely places of damage. The developed model was trained on experimental data obtained for KAMAZ vehicles of the K5 family, while the analysis of quantitative metrics showed a high quality binary classification. The results of the work are planned to be used to improve the process of conducting vibration resistance tests.

Keywords: truck, vibration resistance testing, forecasting, machine learning

Испытания на вибропрочность являются обязательным этапом при разработке и модернизации кабин грузовых автомобилей, так как вибрационные нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации транспортных средств, существенно влияют на долговечность конструкции, безопасность и комфорт водителя [1]. Результаты экспериментальных исследований показывают, что вибрационные воздействия приводят к накоплению усталостных повреждений, возникновению трещин и локальных разрушений элементов каркаса и облицовки кабины [2].

Используемые в настоящее время методики проектирования узлов и агрегатов транспортных средств с учетом требований к вибропрочности имеют недостаточную точность, поэтому до 35 % новых конструкций грузовых автомобилей не проходят первичные испыта-

ния по этому показателю. Так как проведение вибрационных испытаний требует значительного количества ресурсов (прежде всего, дорогостоящего оборудования), связанные с этим избыточные затраты могут быть весьма значительными.

Одним из способов сокращения количества избыточных испытаний является создание прогнозной модели на основе анализа имеющихся данных о результатах уже проведенных экспериментов. Построив такую модель, можно на предварительном этапе исключать конструктивные решения, которые с высокой степенью вероятности не пройдут испытаний на вибропрочность, что позволит сократить количество проводимых натурных испытаний и объем связанных с этим затрат [3].

Целью данной работы является создание модели для прогнозирования результатов испытаний на вибропрочность кабин грузовых автомобилей с использованием методов машинного обучения. В качестве основной задачи рассматривается прогнозирование факта прохождения испытаний в виде бинарного классификационного признака («испытание пройдено» / «испытание не пройдено») на основе совокупности данных о значениях конструктивных параметров и характеристик вибрационного воздействия. Дополнительными задачами являются определение качества классификации с точки зрения практической применимости разработанной модели и оценка степени влияния различных параметров на результаты испытаний.

В качестве исходных данных для построения модели использовались протоколы испытаний кабин грузовых автомобилей на вибропрочность, проводимых в научно-техническом центре ПАО «КАМАЗ». Каждый протокол содержит сведения о конструктивных особенностях кабины, ее массогабаритных характеристиках, параметрах вибрационных воздействий, а также результат испытания, фиксируемый в виде бинарного признака («испытание пройдено» / «испытание не пройдено») и информацию о месте разрушения (при наличии).

Всего в бланке протокола имеется более тридцати заполняемых полей, часть из которых носит идентификационный характер и не связана непосредственно с результатом испытаний (например, номер протокола). В рамках предварительной обработки данных такие параметры были исключены из анализа. Дополнительно были исключены признаки, значения которых оставались постоянными для всех испытаний (например, материал каркаса). После исключения указанных параметров был сформирован итоговый набор из 27 информативных признаков, который включал в себя:

- количественные параметры (масса и габариты кабины, координаты центра масс, максимальные и среднеквадратичные значения ускорений по всем осям, длительность проведения испытаний и т. д.);
- категориальные параметры (тип автомобиля, форма каркаса, количество спальных мест и т. д.).

Для обеспечения возможности применения методов машинного обучения категориальные признаки были приведены к числовому виду с использованием порядкового кодирования, количественные признаки были нормализованы [4]. Построение модели проводилось на основе выборки из 9 протоколов стендовых испытаний кабин грузовых автомобилей семейства К5 со следующим распределением: успешное прохождение испытаний – 7 протоколов (78 %); отрицательный результат при испытаниях – 2 протокола (22 %).

Для прогнозирования результатов испытаний использовалась модель машинного обучения на основе логистической регрессии. При этом результат обучения представляет собой линейную функцию с сигмидой на выходе. Процесс обучения проводился с использованием библиотеки Scikit-Learn на языке программирования Python [5].

Архитектура разработанного программного комплекса, включающего модули обучения модели и прогнозирования результатов испытаний, представлена на рисунке.

В каталоге data размещаются исходные файлы с результатами протоколов виброиспытаний кабин грузовых автомобилей, содержащие значения конструктивных параметров и результаты испытаний. В процессе выполнения скрипта `retrain_kabiny.py` производится обучение модели и сохранение обученных параметров и кодировщиков в каталоге `models`. Результаты прогнозирования формируются с использованием скриптов `predict_one.py`

и batch_predict_kabiny.py и сохраняются в каталоге results для последующего анализа. Предложенная структура программного комплекса обеспечивает удобство применения модели и воспроизводимость вычислительных экспериментов.

```

project_kabiny/
├── data/
│   ├── train_data.xlsx # исходные протоколы виброиспытаний
│   └── test_data.xlsx  # тестовые данные / примеры
├── models/
│   ├── model_kabiny.pkl # обученная модель прогнозирования прохождения
│   └── encoder_kabiny.pkl # кодировщик категориальных признаков
├── results/
│   └── predictions_kabiny.xlsx # результаты массового прогнозирования
├── retrain_kabiny.py      # обучение модели и LOOCV
├── predict_one.py         # прогноз по одной кабине
└── batch_predict_kabiny.py # массовый прогноз по серии кабин

```

Структура программного комплекса прогнозирования результатов виброиспытаний кабин грузовых автомобилей

В качестве целевой переменной использовался бинарный признак, характеризующий факт прохождения испытания. Создаваемая модель формирует вероятностную оценку прохождения испытания, бинарное решение на основе заданного порогового значения и определяет наиболее вероятное место разрушения. Для оценки качества прогнозирования применялась проверка в виде поэлементной кросс-валидации, обеспечивающей использование максимального объема данных при обучении модели [4].

По результатам обработки исходных данных была построена логистическая регрессия, для которой были определены метрики качества (табл. 1).

Таблица 1

Метрики качества бинарной классификации

Метрика	Значение	Интерпретация
Accuracy	0,889	Доля верных прогнозов
F1-score	0,923	Сбалансированная точность
ROC-AUC	0,857	Качество ранжирования
Порог принятия решения	0,55	Условие прохождения испытания

Высокие значения метрик Accuracy и F1-score свидетельствуют о способности модели достоверно прогнозировать исход испытаний на вибропрочность. Значение ROC-AUC подтверждает хорошую дискриминационную способность модели в условиях ограниченного объема данных.

Анализ значений полученных коэффициентов регрессии показал, что на результат испытаний наибольшее влияние оказывают следующие параметры: масса кабины и каркаса; геометрические размеры кабины; координаты центра масс; среднеквадратические и пиковые ускорения по осям X, Y и Z.

При этом отдельные конструктивные признаки, рассматриваемые изолированно, не позволяют однозначно определить результат испытания, однако их совместное влияние существенно повышает точность прогнозирования.

Для демонстрации практической применимости разработанной модели был выполнен прогноз результатов испытаний для двух кабин (протоколы с положительным и отрицательным результатом испытаний соответственно). Результаты прогнозирования представлены в табл. 2.

Результаты тестирования сформированной модели

№ протокола	Вероятность прохождения, %	Решение	Наиболее вероятное место разрушения
№ 17-17300-27113-2025	83,3	Пройдет	Нет разрушений
№ 17-17300-27505-2025	4,8	Не пройдет	Стабилизатор 0,89 Кронштейн 0,54

Таким образом, разработанная модель позволяет с высокой точностью классифицировать результаты испытаний и количественно оценивать степень риска отрицательного результата испытаний, а также прогнозировать наиболее вероятное место разрушения конструкции.

Выполнен анализ протоколов испытаний кабин грузовых автомобилей на вибропрочность, проведена предварительная обработка данных и сформирован набор информативных признаков. Сформирована модель на основе логистической регрессии, позволяющая прогнозировать результаты испытаний. Проведено обучение модели с использованием библиотеки Scikit-Learn на языке программирования Python, результаты которого характеризуются высокими значениями метрик качества классификации. Полученные результаты планируется использовать в дальнейшем для повышения эффективности процесса проведения испытаний на вибропрочность в научно-техническом центре ПАО «КАМАЗ».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горобцов, А.С. Оценка вибронагруженности сиденья водителя на примере модели грузового автомобиля с детальной проработкой элементов подвесок кабины / А.С. Горобцов, С.К. Карцов, Ю.А. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 10. – С. 159–161.
2. Лозовский, Н.Т. Эксплуатационная долговечность кабин грузовых автомобилей / Н.Т. Лозовский, Г.В. Борисов, Н.А. Кузьмин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 44–49.
3. Вильданов, А.Г. Автоматизация процесса проведения испытаний на вибропрочность автомобилей КАМАЗ / А.Г. Вильданов, Д.Н. Демьянов // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 2. – С. 25–29.
4. Жуков, Д.А. Влияние объема контрольной выборки на качество диагностики состояния технического объекта / Д.А. Жуков, В.Н. Клячкин // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 2 (52). – С. 90–95.
5. Scikit-learn: Machine Learning in Python [Electronic resource]. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/index.html> (дата обращения: 24.01.2026).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО СВЕРЛИЛЬНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Воронецкий Н.М. , студент, **Носов Н.В.**, профессор, д.т.н., профессор

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: voronetskiy.02@mail.ru

Рассматривается процесс проектирования универсального сверлильного приспособления, применяемого для обработки отверстий в различных заготовках. Приведен анализ типов сверлильных приспособлений – специализированных, универсально-сборных и универсальных. Показаны их конструктивные особенности, преимущества и недостатки. Особое внимание уделено применению универсального приспособления, обеспечивающего снижение затрат на переналадку и повышение производительности труда. Рассмотрены нормативные документы, регламентирующие проектирование и изготовление приспособлений по ГОСТ и ЕСКД.

Ключевые слова: сверлильное приспособление, универсальность, наладка, точность обработки, машиностроение

DESIGNING A UNIVERSAL DRILLING RIG

Voronetsky N.M. , student, **Nosov N.V.**, Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: voronetskiy.02@mail.ru

The article discusses the design process of a universal drilling rig used to process holes in various workpieces. An analysis of the types of drilling devices – specialized, universally assembled and universal – is given. Their design features, advantages and disadvantages are shown. Special attention is paid to the use of a universal device that reduces the cost of readjustment and increases labor productivity. The normative documents regulating the design and manufacture of devices according to GOST and ESCD are considered.

Keywords: drilling rig, versatility, adjustment, precision machining, mechanical engineering

Сверлильные приспособления являются важной частью технологического оснащения в машиностроении. Их основное назначение – обеспечить точное и устойчивое положение заготовки при сверлении отверстий, повышая точность обработки и безопасность труда. Приспособление представляет собой устройство, предназначенное для установки и закрепления заготовки при выполнении технологических операций [1].

В современном производстве используются три основных типа сверлильных приспособлений:

1. Специализированные (индивидуальные) приспособления – разрабатываются под конкретную деталь или группу деталей. Они обеспечивают наивысшую точность и производительность, но требуют значительных затрат на проектирование и изготовление, такие приспособления применяются преимущественно в массовом производстве.

2. Универсально-сборные приспособления (УСП) – конструкция состоит из набора стандартных элементов, которые можно собирать под различные операции. Они описаны в [2] и широко применяются в условиях единичного и мелкосерийного производства. Основное преимущество – многократное использование и сокращение времени подготовки. Недостатки – сниженная жесткость и возможные потери точности при многократных сборках.

3. Универсальные приспособления – предназначены для обработки широкого спектра деталей без перестройки или с минимальными изменениями конструкции. Такие устройства

особенно эффективны на мелкосерийных производствах, где ассортимент деталей часто меняется. Их проектирование требует комплексного подхода, включающего анализ усилий зажима, геометрических ограничений и точности позиционирования [2–4].

Преимущества и недостатки основных видов сверлильных приспособлений приведены в таблице.

Сравнительная характеристика сверлильных приспособлений

Вид приспособления	Преимущества	Недостатки	Область применения
Под конкретную деталь	Высокая точность и жесткость; минимальные погрешности	Высокая стоимость, сложность: проектирования, изготовления	Массовое производство
УСП (универсально сборные)	Быстрая сборка, модульность, повторное использование	Меньшая жесткость, сниженная точность	Мелко- и среднесерийное производство
Универсальное	Гибкость применения, минимальная переналадка, экономия места	Сложность проектирования, изготовления	Универсальные станки, лаборатории, опытные производства

Для проектирования универсального сверлильного приспособления за основу был взят эскиз сверлильной операции детали «Корпус разъема гидроцилиндра» (рис. 1). На эскизе видно, что технологическими базами являются грани шестигранника и его торец [5].

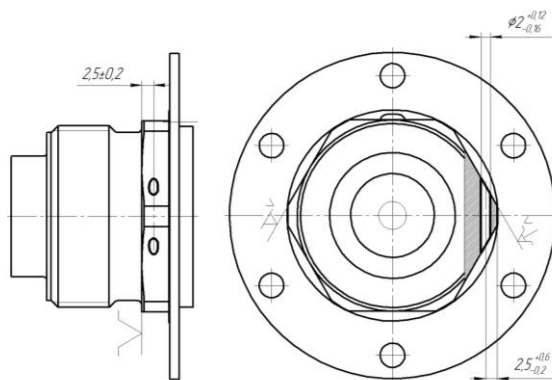


Рис. 1. Эскиз сверлильной операции

Для разработки приспособления были определены основные требования [6]:

1. Обеспечение точного и надежного базирования детали.
2. Гарантированное удержание детали при действии сил резания.
3. Использование стандартных и унифицированных элементов (направляющие втулки, зажимы, упоры).
4. Возможность регулировки положения базовых элементов для адаптации к разным изделиям.
5. Применение жестких, износостойких материалов в рабочих зонах.
6. Удобство и безопасность при установке и снятии заготовки.
7. Легкий доступ к зоне обработки и возможность удаления стружки.
8. Минимальные трудозатраты на обслуживание, смазку, чистку и ремонт.
9. Возможность точного изготовления и сборки приспособления.
10. Обеспечение взаимозаменяемости деталей и узлов.
11. Минимизация затрат на переналадку для разных типоразмеров деталей.

На основе данных требований был спроектирован универсальный кондуктор (рис. 2, 3). Он представляет собой самоцентрирующий механизм со сменными губками (рис. 4).

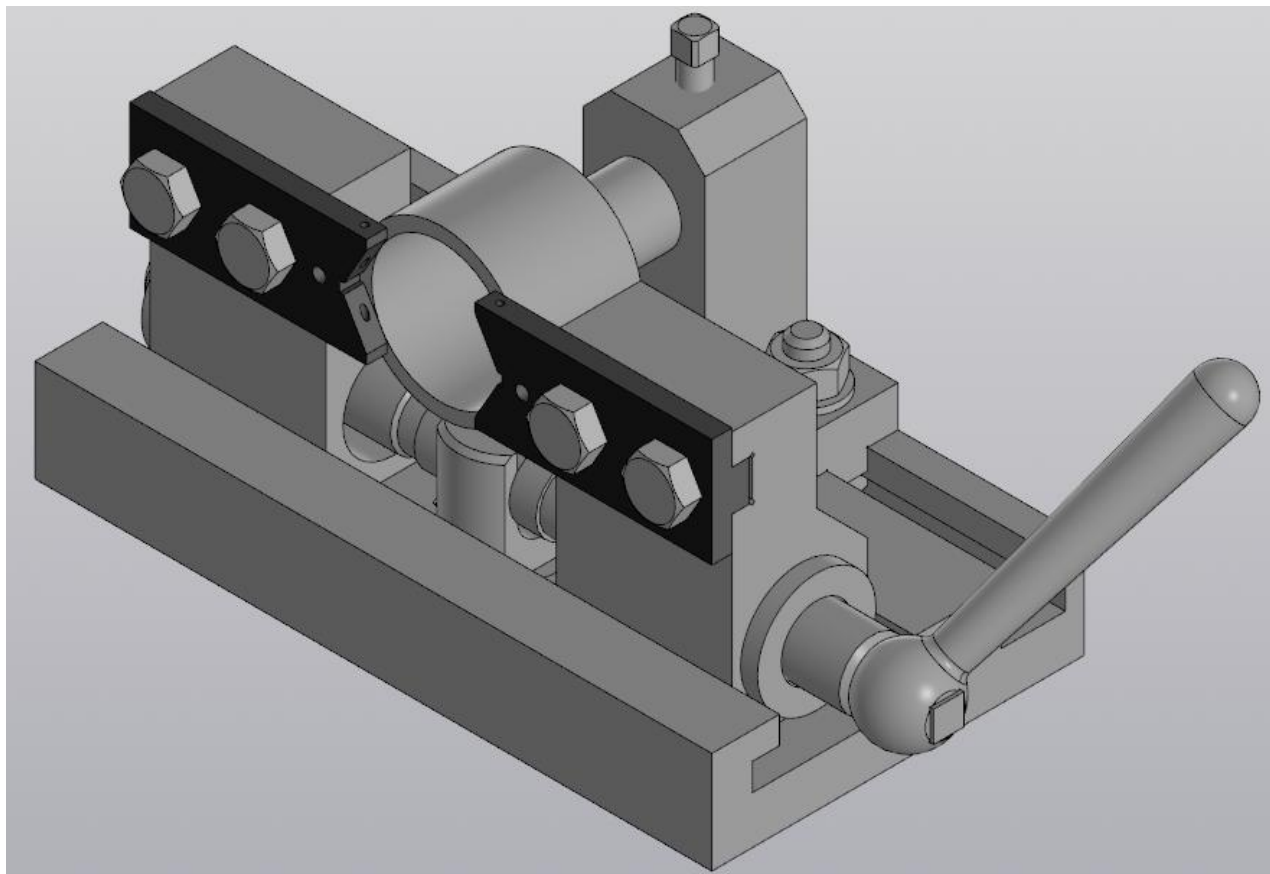


Рис. 2. 3D-модель кондуктора

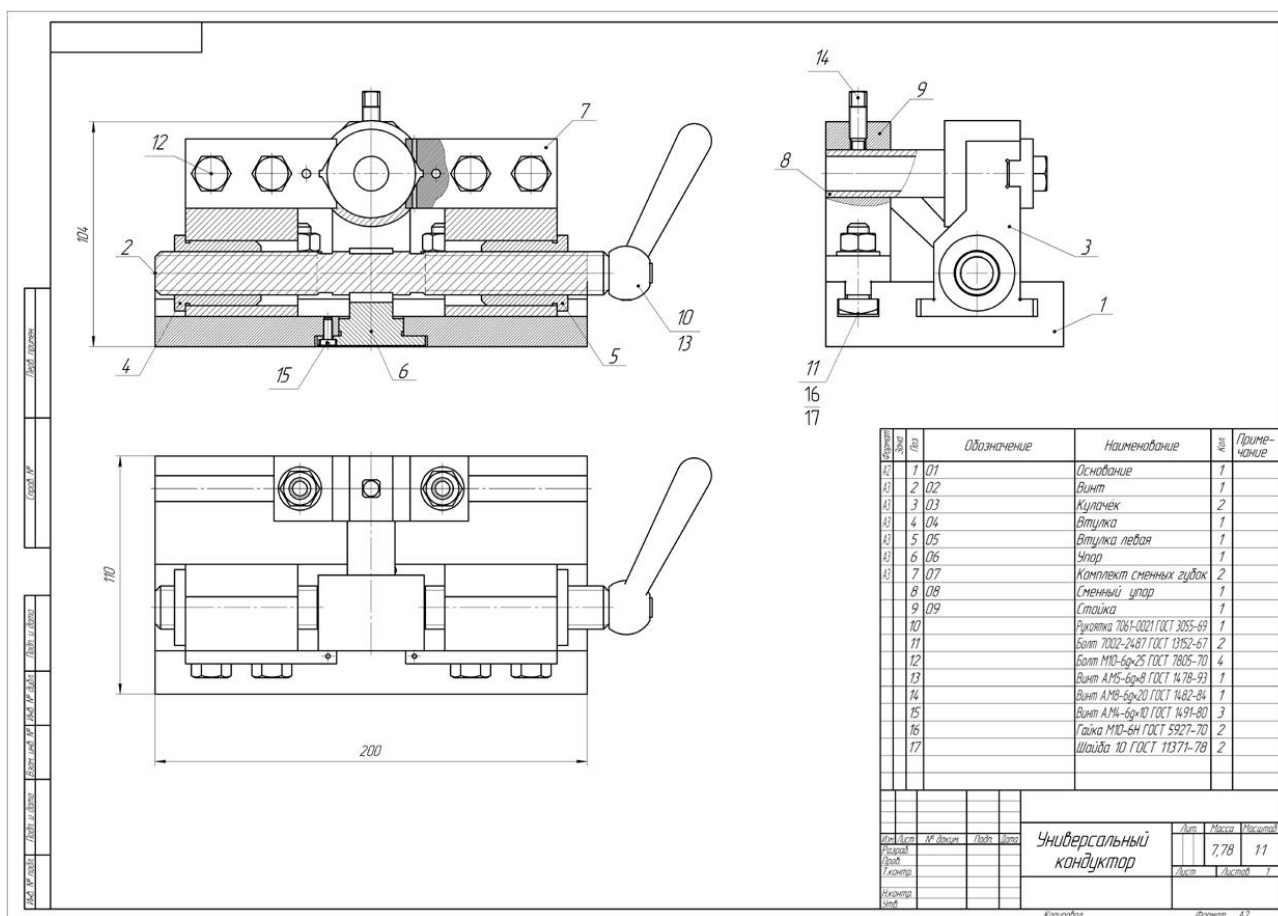


Рис. 3. Сборочный чертеж кондуктора

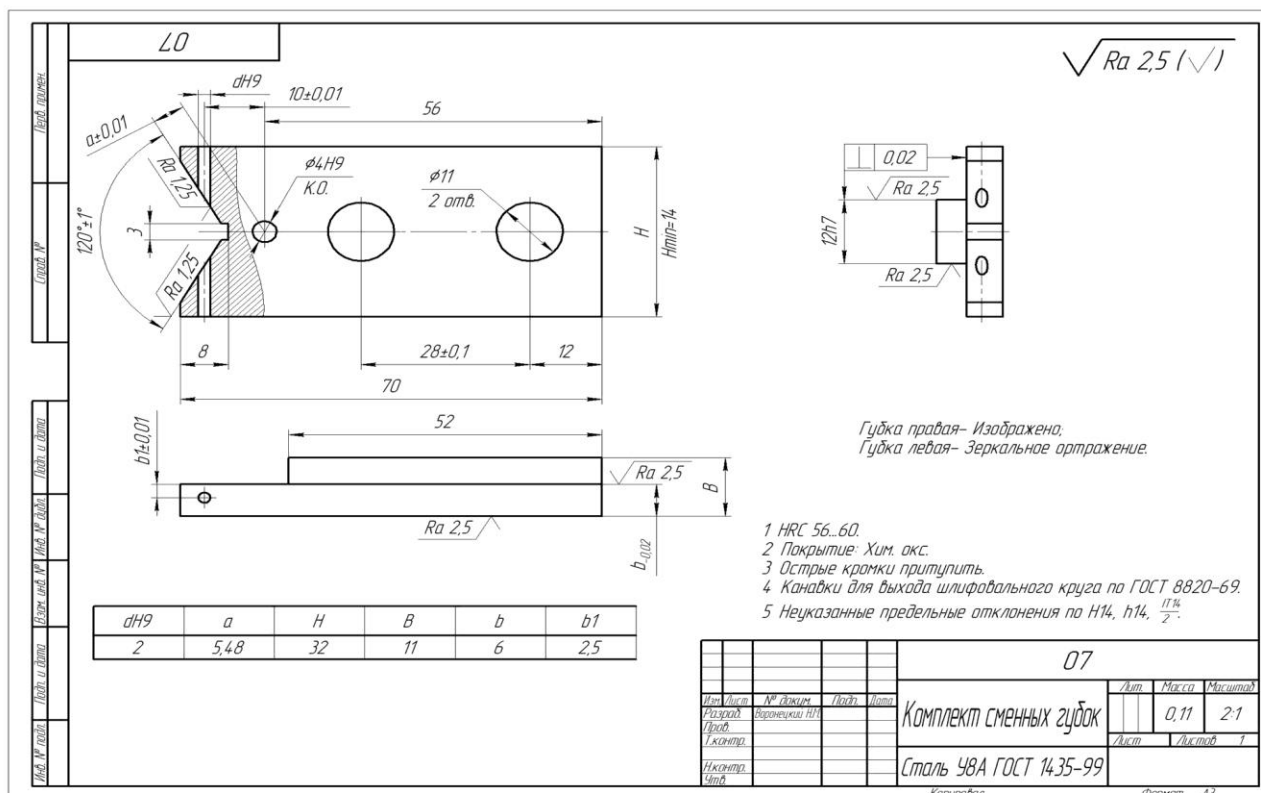


Рис. 4. Комплект сменных зубок

В ходе анализа установлено, что универсальное сверлильное приспособление является оптимальным решением для предприятий с переменным номенклатурным рядом изделий. Его применение позволяет снизить время переналадки оборудования, уменьшить расходы на проектирование новых приспособлений, повысить коэффициент использования оборудования. Проектирование универсального сверлильного приспособления обеспечивает повышение эффективности производственного процесса за счет совмещения свойств универсальности и точности. На основании анализа различных типов оснастки установлено, что универсальные приспособления являются перспективным направлением развития технологического оснащения машиностроительных предприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 21495-76. Приспособления технологические. Термины и определения. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. – 12 с.
2. ГОСТ 16518-96. Приспособления универсально-сборные. Общие технические требования. – Москва: Госстандарт России, 1996. – 20 с.
3. ГОСТ 12.2.009-99. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – Москва: Госстандарт России, 1999. – 28 с.
4. ГОСТ 30893.1-2002. Приспособления технологические. Допуски и посадки. – Москва: Изд-во стандартов, 2002. – 35 с.
5. ГОСТ 21495-76. Базы и базирование в технологическом оборудовании. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. – 37 с.
6. Кузнецов, В.И. Проектирование технологической оснастки: учебное пособие / В.И. Кузнецов. – Москва: Машиностроение, 2016. – 320 с.

РАЗРАБОТКА WEB-РЕСУРСА КАК ИНСТРУМЕНТА ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Гаспарова Л.Б.✉, доцент, к.п.н., доцент, Нигматуллин А.Р., старший преподаватель

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: gasparova@mail.ru

Рассматривается механизм привлечения абитуриентов и повышения конкурентоспособности образовательной программы. Проблема низкой информированности абитуриентов решается через разработку web-ресурса, который предоставляет актуальную информацию о программе, требованиях, карьерных перспективах, учебных дисциплинах и инфраструктуре. Платформа обеспечит абитуриентам удобный инструмент выбора направления, а вузу – эффективное привлечение студентов.

Ключевые слова: абитуриент, web-ресурс, контент сайта, конкурентоспособность

CREATING A WEB RESOURCE AS A TOOL FOR INCREASING THE COMPETITIVENESS OF AN EDUCATIONAL PROGRAM

Gasparova L.B.✉, PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Nigmatullin A.R., senior lecturer

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: gasparova@mail.ru

The mechanism of attracting applicants and increasing the competitiveness of the educational program is being considered. The problem of low awareness among applicants is being solved through the development of a web resource (platform) that provides up-to-date information about the program, requirements, career prospects, academic disciplines, and infrastructure. The platform will provide applicants with a convenient tool for choosing a field of study, and the university will effectively attract students.

Keywords: applicants, web resource, website content, competitiveness

В современном обществе привлечение будущего студента и удержание его в вузе становится одним из самых важных факторов. В последние годы отмечена тенденция роста числа бюджетных мест в вузах. В связи с этим образовательные учреждения включаются в «борьбу за абитуриента», чтобы привлечь к себе на обучение лучших выпускников [1, 2].

В Самарском регионе большое количество учебных заведений, дающих возможность выпускникам получить высшее образование. Так, например, Самарский государственный технический университет реализует широкий спектр образовательных программ по направлениям подготовки высококвалифицированных кадров для всех ключевых отраслей промышленности. В связи с этим многим абитуриентам, которые поступают в вуз с целью в дальнейшем построить карьеру, было бы интересно узнать больше о специальностях. Но зачастую выпускники школ даже не представляют, какую востребованную специальность можно получить в стенах того или иного университета, не знают о будущих специальностях и их перспективах.

В связи с этим разработка и продвижение web-ресурса о направлениях подготовки с целью популяризации и повышения узнаваемости этих направлений и университета в целом, а также привлечения абитуриентов – будущих потенциальных сотрудников предприятий является актуальной задачей.

Рассмотрим предлагаемую структуру платформы. Платформу в зависимости от размещаемой информации можно разделить на две части: стандартную и кастомную.

Контент стандартной платформы:

1. Имиджевый презентационный ролик об образовательной программе.
2. Презентация (рис. 1) образовательной программы (не более 15 слайдов).
3. Презентации изучаемых спецдисциплин (не более 10 слайдов).
4. Виртуальные экскурсии по вузу (аудитории, лаборатории, оборудование, инфраструктура).
5. Фотогалерея (рис. 2) вуза (аудитории, лаборатории, оборудование, инфраструктура).
6. Визитки с отзывами (рис. 3) и ролики-интервью с обучающимися.

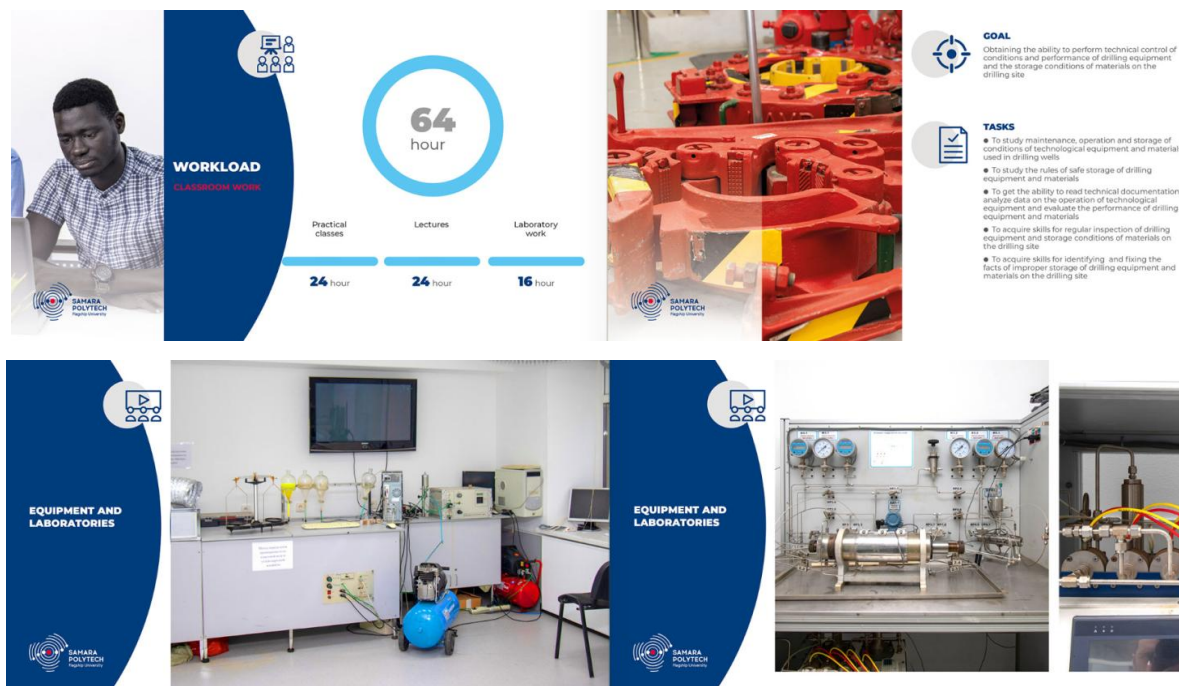


Рис. 1. Презентация образовательной программы

Галерея

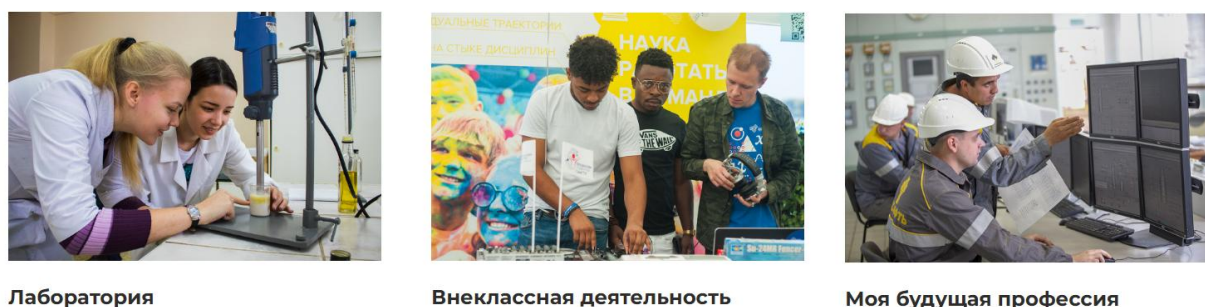


Рис. 2. Фотогалерея вуза

Контент кастомной платформы (эта часть может быть разработана одновременно под разных индустриальных партнеров).

1. Имиджевый презентационный ролик о предприятии-заказчике.
2. Ролики с интервью выпускников (рис. 4), работающих на предприятии-заказчике, в формате «История успеха».
3. Ролики с обучающимися, являющимися студентами целевого обучения от предприятия.
4. Виртуальные экскурсии по предприятию (аудитории, лаборатории, оборудование, инфраструктура).
5. Фотогалерея предприятия (аудитории, лаборатории, оборудование, инфраструктура).

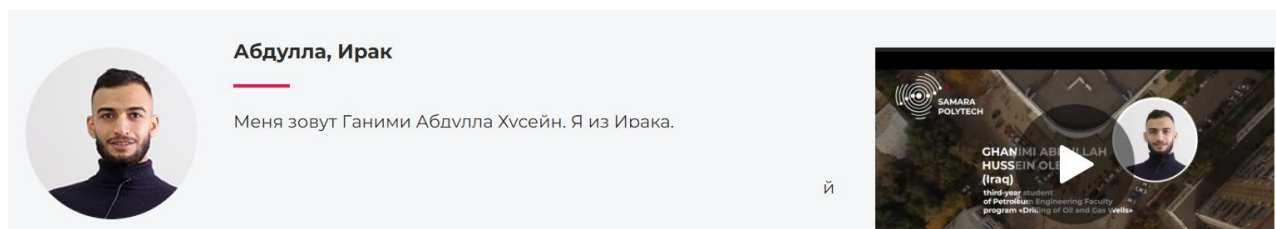


Рис. 3. Визитка с отзывом и ролик-интервью с обучающимся

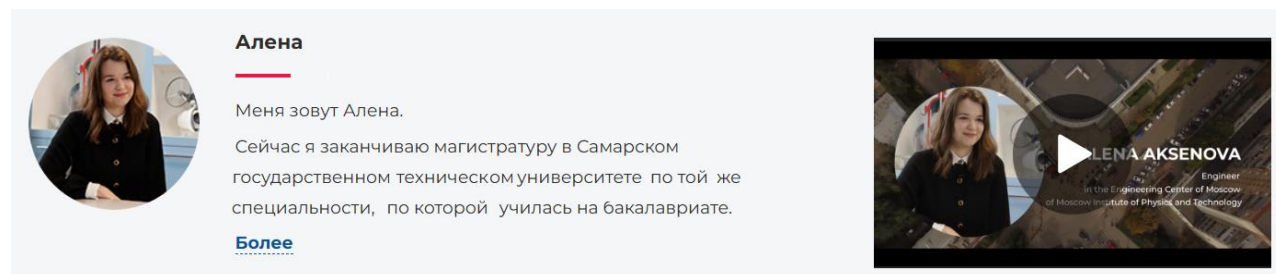


Рис. 4. Визитка с отзывом и ролик-интервью с выпускником

Таким образом, платформа даст возможность абитуриентам получить полное, наглядное и структурированное представление не только о программе подготовки, но и о возможном будущем месте работы.

Одной из ключевых отраслей региона является машиностроение. Эта отрасль объединяет проектирование, разработку, производство и эксплуатацию машин и оборудования. Современным машиностроительным предприятиям необходимы высококвалифицированные специалисты, способные не только разрабатывать новые технологии, но и внедрять их на уровне производства. Сегодня на этих предприятиях наблюдается «кадровый голод», и на рынке труда резко возросла потребность в таких специалистах.

В ближайшее время планируем разработку платформы для продвижения образовательных программ машиностроительного профиля: 15.03.01 «Машиностроение» и 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», которая, в свою очередь, обеспечит решение следующих задач:

1. Приток квалифицированных кадров на машиностроительные предприятия региона.
2. Популяризация машиностроительных направлений подготовки и привлечение абитуриентов – будущих потенциальных сотрудников предприятий.
3. Целенаправленный и осознанный выбор абитуриентами своей будущей профессии.
4. Уменьшение оттока абитуриентов в другие регионы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Константинова, Д.С. Цифровые компетенции как основа трансформации профессионального образования / Д.С. Константинова, М.М. Кудяева // Экономика труда. – 2020. – № 11. – С. 1055–1072.
2. Казакова, М.С. Разработка комплекса мер по успешному привлечению абитуриентов в отраслевые вузы в сети Интернет / М.С. Казакова, А.А. Кудряшов // Креативная экономика. – 2021. – Т. 15, № 7. – С. 2939–2952. – DOI: 10.18334/ce.15.7.112362.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Гатауллин А.Р. , аспирант, Демьянов Д.Н., доцент, к.т.н., доцент

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Набережные Челны, Российская Федерация
E-mail: adr.gataullin@mail.ru

Представлены математическая и компьютерная модели управляемой пневматической подвески грузового автомобиля. Разработанные модели описывают термодинамические процессы в пневмоэлементах и связанное с этим движение кузова автомобиля, а также работу алгоритма управления клапанами пневмосистемы на основе ПД-регулятора с широтно-импульсной модуляцией. Проведена серия вычислительных экспериментов, подтверждающих адекватность разработанных моделей. Результаты работы планируется использовать для оптимизации алгоритмов управления пневмоподвеской.

Ключевые слова: грузовой автомобиль, пневматическая подвеска, математическая модель, компьютерная модель, динамика движения кузова, алгоритм управления

SIMULATION OF A TRUCK CONTROLLED AIR SUSPENSION

Gataullin A.R. , PhD student,
Demyanov D.N., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation
E-mail: adr.gataullin@mail.ru

The article presents a mathematical and computer model of a controlled air suspension of a truck. The developed model describes the thermodynamic processes in pneumatic elements and the associated movement of the car body, as well as the operation of an algorithm for controlling the valves of a pneumatic system based on a PD regulator with pulse-width modulation. A series of computational experiments confirmed the adequacy of the developed model. The results of the work are planned to be used to optimize air suspension control algorithms

Keywords: truck, air suspension, mathematical model, computer model, dynamics of body movement, control algorithm

Современные грузовые автомобили оснащаются электронными блоками управления пневматической подвеской, позволяющими регулировать ее жесткость и высоту кузова, тем самым улучшая плавность хода [1]. Подобные системы особенно важны при работе в различных дорожных условиях и с переменной нагрузкой. Разработка эффективных алгоритмов управления такими системами требует создания адекватных математических моделей для описания протекающих в них динамических процессов. Целью данной работы является создание математической и компьютерной моделей пневматической подвески грузового автомобиля, описывающих переходные процессы при изменении высоты кузова, для анализа динамики системы и совершенствования алгоритмов управления.

Упрощенная математическая модель динамики грузового автомобиля с управляемой пневматической подвеской включает в себя следующие компоненты [2]: модель термодинамических процессов в пневмоэлементе, модель изменения жесткости подвески и положения кузова, алгоритм управления клапанами пневмосистемы.

Уравнение состояния газа в пневмоэлементе:

$$pV = mRT. \quad (1)$$

Динамика изменения давления:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT\alpha(p_m - p) - pV_g v}{V}. \quad (2)$$

Сила, создаваемая двумя пневматическими баллонами:

$$F = 2pA_w \left(\frac{V_0}{V}\right)^x. \quad (3)$$

Уравнение движения кузова:

$$M \frac{d^2 h}{dt^2} + B \frac{dh}{dt} = F - Mg. \quad (4)$$

Геометрическая связь объема и высоты пневмобаллона:

$$V = V_0 + V_g(h - h_0). \quad (5)$$

Уравнение ошибки регулирования:

$$e = L_{target} - L_{current}. \quad (6)$$

Выходной сигнал ПД-регулятора:

$$u = K_p e + K_d \frac{de}{dt}. \quad (7)$$

В уравнениях (1)–(7) обозначено: p – давление в баллоне; V – объем баллона; m – масса воздуха в баллоне; R – газовая постоянная; T – температура воздуха в баллоне; α – коэффициент расхода; p_m – давление в магистрали; V_g – объемный градиент; v – скорость изменения высоты баллона; F – сила, действующая на кузов автомобиля со стороны подвески; A_w – эффективная площадь баллона; V_0 – объем баллона в нейтральном состоянии; x – показатель политропы; M – масса автомобиля; B – коэффициент демпфирования; g – ускорение свободного падения; h – положение подвески; h_0 – положение подвески в нейтральном состоянии; e – ошибка регулирования; L_{target} – заданная высота кузова; $L_{current}$ – текущая высота кузова; u – выходной сигнал регулятора; K_p – коэффициент пропорционального усиления; K_d – коэффициент дифференциального усиления. Величина L_{target} задается извне, она определяет положение, в которое требуется перевести кузов автомобиля. Значение $L_{current}$ определяет текущее положение кузова и соответствует переменной h в формуле (4). Используемые числовые значения параметров модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров модели

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Масса кузова	M	10000	кг
Нейтральное положение	h_0	0,325	м
Эффективная площадь	A_w	0,0547	м ²
Нейтральный объем	V_0	0,016	м ³
Коэффициент демпфирования	B	50000	Н·с/м
Давление ресивера	$p_{рез}$	900000	Па
Пропорциональный коэффициент	K_p	0,01	–
Дифференциальный коэффициент	K_d	20	–

Алгоритм управления положением кузова построен на основе ПД-регулятора. Ошибка регулирования рассчитывается по формуле (6), выходной сигнал регулятора формируется согласно уравнению (7) и определяет режим работы клапанов подъема и спуска: если требуется поднять кузов ($u > 0$), то баллон подключается к ресиверу со сжатым воздухом, если требуется опустить кузов ($u < 0$), то часть воздуха из баллона выпускается в атмосферу.

Сигнал управления u определяет коэффициент заполнения ШИМ-сигнала, который пропорционален расходу воздуха через клапан и непосредственно влияет на скорость изменения давления в уравнении (2), замыкая контур управления. Разработанная математическая модель была реализована в системе компьютерной математики MATLAB/Simulink (рис. 1).

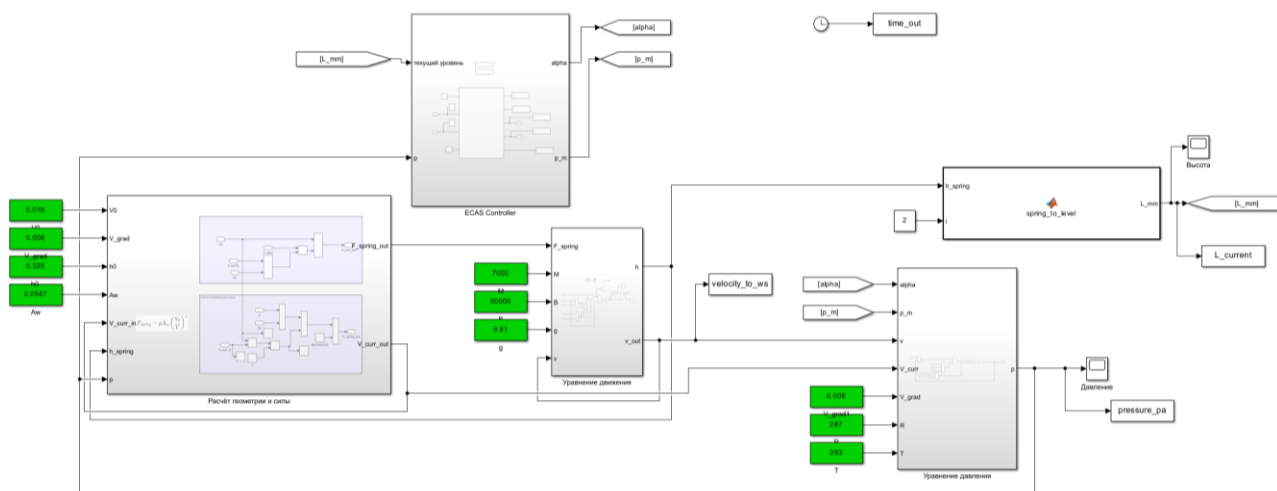


Рис. 1. Структура модели в MATLAB/Simulink

Для оценки адекватности разработанной модели была проведена серия вычислительных экспериментов. Ниже представлены некоторые из полученных результатов.

На рис. 2 отражен полный рабочий цикл системы: начальный спуск кузова с нейтрального состояния до нижнего положения (-151,5 мм); последующий подъем в нейтральное состояние (при этом отмечается небольшое перерегулирование); дополнительный подъем до верхнего положения (+122,5 мм) и финальный спуск до близкого к нейтральному уровня. Каждое изменение высоты сопровождается соответствующим изменением давления в пневмосистеме, что демонстрирует адекватность модели.

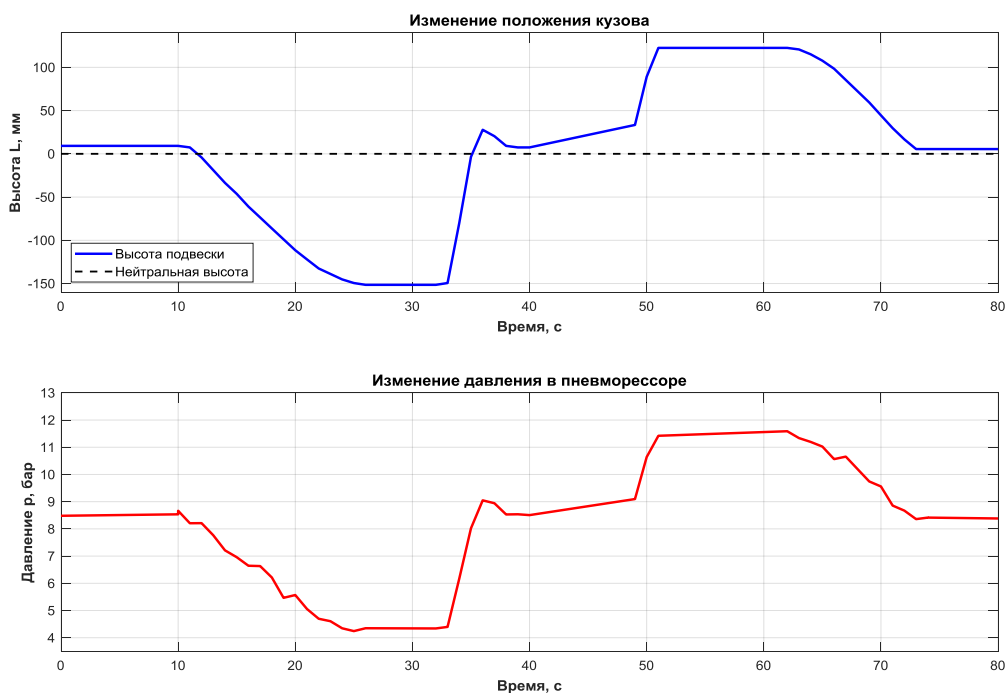


Рис. 2. Изменение положения кузова и давления в пневморессоре

На рис. 3 представлены временные диаграммы управления клапанами пневмосистемы. Можно заметить, что клапан RA_32, отвечающий за подачу воздуха из ресивера, активируется

на участках подъема (32–36 с и 48–51 с). Клапан RA_Cut, осуществляющий сброс воздуха в атмосферу, активен на участках спуска (10–26 с и 60–74 с), а также включается кратковременно в процессе подъема (33–35 с и 36–39 с) для точного регулирования потока воздуха.

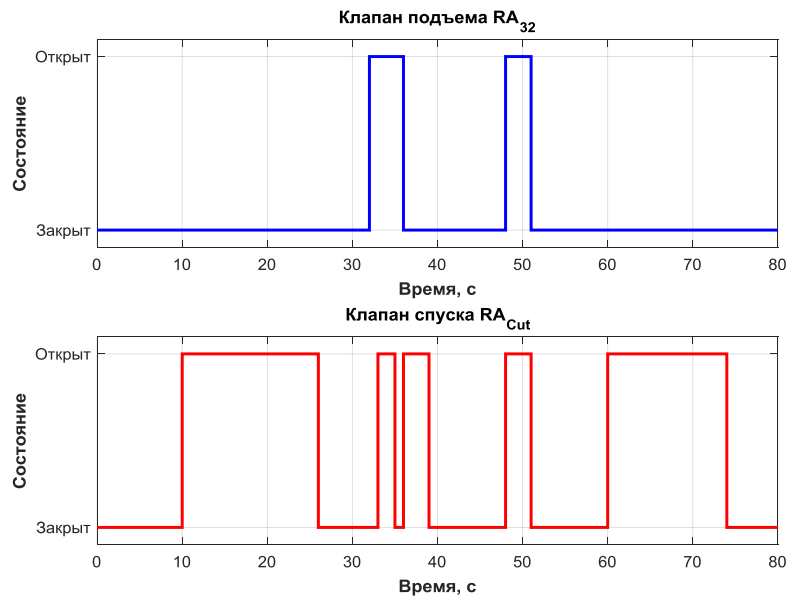


Рис. 3. Графики работы клапанов RA₃₂ и RA_{Cut}

На рис. 4 представлены графики переходных процессов, соответствующих ключевым режимам работы системы. На рис. 4, а показан процесс спуска от 0 до -151,5 мм с последующим установлением на целевом значении. Рис. 4, б иллюстрирует процесс подъема от -151,5 до 0 мм с перерегулированием 27,8 мм и последующей стабилизацией на высоте 7,4 мм. На рис. 4, в представлен быстрый подъем от 33,4 до 122,5 мм с быстрым установлением на целевом значении. Рис. 4, г показывает процесс спуска от 122,5 до 5,5 мм с плавным переходом и установлением на требуемой высоте.

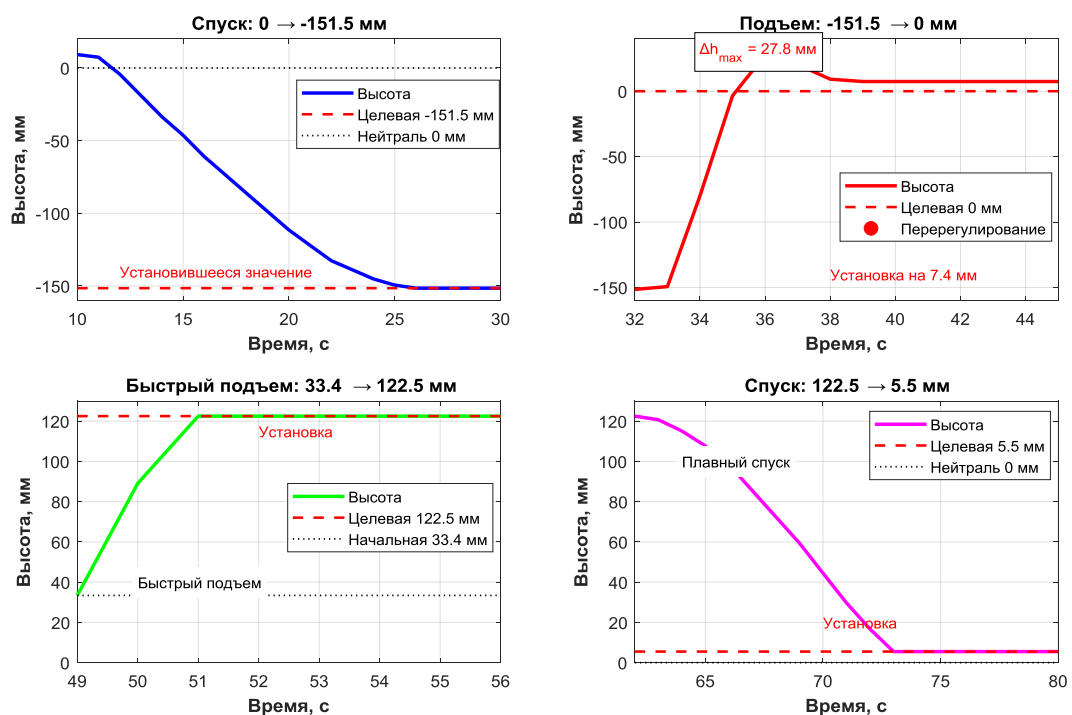


Рис. 4. Детальные графики для ключевых режимов работы

Проведенный анализ результатов компьютерного моделирования позволил определить количественные характеристики эффективности работы пневмоподвески (табл. 2), при этом полученные значения соответствуют типовым показателям систем ECAS [3].

Таблица 2

Количественные характеристики эффективности работы пневмоподвески

Режим работы	Начальная высота, мм	Конечная высота, мм	Время, с	Средняя скорость, мм/с	Начальное давление, бар	Конечное давление, бар
Спуск 0 → -151,5 мм	0,0	-151,5	16,0	9,5	9,0	4,2
Подъем -151,5 → 0 мм	-151,5	7,4	8,0	19,9	4,2	8,5
Подъем 33,4 → 122,5 мм	33,4	122,5	2,0	44,6	6,8	8,5
Спуск 122,5 → 5,5 мм	122,5	5,5	12,0	9,8	8,5	4,8

По результатам анализа можно сделать вывод об адекватности разработанной модели:

- 1) время переходных процессов (12–16 с на ход 120–150 мм) и точность позиционирования (± 10 мм) находятся в характерных для подобных систем диапазонах;
- 2) перерегулирование (27,8 мм или 18,4 % от хода) соответствует физике пневматических систем;
- 3) отсутствие колебаний после установки и плавность изменения высоты подтверждают корректность выбранных параметров модели и коэффициентов регулятора.

Таким образом, модель может использоваться для анализа динамики и предварительной настройки системы управления пневматической подвеской. Разработанная математическая модель пневматической подвески адекватно описывает взаимосвязь изменения высоты кузова и динамики давления в пневмосистеме. Реализованный алгоритм управления на основе ПД-регулятора с широтно-импульсной модуляцией обеспечивает плавное изменение высоты с заданными скоростными характеристиками и корректное управление клапанами.

Результаты моделирования показывают достижение точности позиционирования в пределах ± 10 мм, плавности переходных процессов без недопустимых колебаний и соответствия скоростных характеристик типовым значениям для грузовых автомобилей. Наблюдаемое перерегулирование характерно для пневматических систем и может быть скорректировано настройкой регулятора.

Таким образом, разработанная модель является адекватной, она может быть использована в дальнейшем для оптимизации параметров системы и совершенствования алгоритмов управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чуприков, О.В. Электронные системы автомобиля КАМАЗ-5490. Тормозная система EBS3 и пневмоподвеска ECAS производства WABCO / О.В. Чуприков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 461–466.
2. Independent Suspension Air Spring: MATLAB Documentation [Electronic resource]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/vdynblks/ref/independentsuspensionairspring.html> (дата обращения: 24.01.2026).
3. Optiride Electronically Controlled Air Suspension (ECAS) for buses and trucks with CAN II (SAE 1939): Maintenance manual [Electronic resource]. – URL: https://www.zf.com/products/media/automotive/cv/literature_downloads_wna/truck_solutions/air_suspension_maintenance_manuals/MM1315_web_2.pdf (дата обращения: 24.01.2026).

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ ЦЕХОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЦЕХОВКИ

Говорков А.С. , к.т.н., доцент, Фокин И.В., соискатель

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация
E-mail: govorkov_as@ex.istu.edu*

Разработана математическая модель оптимизации загрузки цехов машиностроительного предприятия на основе задачи расцеховки с учетом ограничений по мощности, срокам и технологическим маршрутам. Предложен гибридный подход, в котором искусственная нейронная сеть используется для формирования или оценки вариантов распределения операций по цехам. На обезличенных производственных данных показано снижение перегрузки отдельных цехов и уменьшение просрочек выполнения заказов по сравнению с традиционной методикой планирования.

Ключевые слова: оптимизация загрузки цехов; математическая модель расцеховки; нейронные сети в производственном планировании; цифровые технологии в машиностроении; машиностроительное предприятие

OPTIMIZATION OF THE LOADING OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISE WORKSHOPS BASED ON THE MATHEMATICAL MODEL OF FILLING

Govorkov A.S. , PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Fokin I.V., applicant

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation
E-mail: govorkov_as@ex.istu.edu*

A mathematical model has been developed for optimizing the loading of machine-building enterprise workshops based on the task of decoupling, taking into account capacity constraints, deadlines, and technological routes. A hybrid approach is proposed in which an artificial neural network is used to generate or evaluate options for the distribution of operations across workshops. Anonymized production data shows a reduction in the overload of individual workshops and a reduction in delays in order fulfillment compared to the traditional planning methodology.

Keywords: optimization of workshop loading; mathematical model of filling; neural networks in production planning; digital technologies in machine-building; machine-building enterprise

В современных машиностроительных предприятиях возрастают требования к сокращению сроков выполнения заказов, повышению гибкости и эффективному использованию производственных мощностей цехов [2, 3].

Расцеховка, выполняемая на основе опыта технологов или упрощенных эвристических методов, нередко приводит к перегрузке отдельных участков, несбалансированной загрузке оборудования и возникновению просрочек по приоритетным заказам.

Развитие цифровых технологий и систем оперативного управления производством стимулирует внедрение формализованных методов планирования, основанных на математических моделях и алгоритмах оптимизации [4, 6]. Вместе с тем высокая размерность и комбинаторная сложность задачи распределения операций по цехам ограничивает применение чисто точных методов в реальных условиях многономенклатурного производства.

Одним из перспективных направлений является интеграция математических моделей с методами искусственного интеллекта, в частности искусственными нейронными сетями, позволяющими извлекать закономерности из исторических данных предприятия и формировать качественные решения в течение приемлемого времени.

В работе рассматривается подход к оптимизации загрузки цехов машиностроительного предприятия на основе математической модели расцеховки, дополненной нейросетевым модулем, и демонстрируется количественный эффект по результатам численного эксперимента на обезличенных производственных данных (рис. 1, 2) [6, 8].

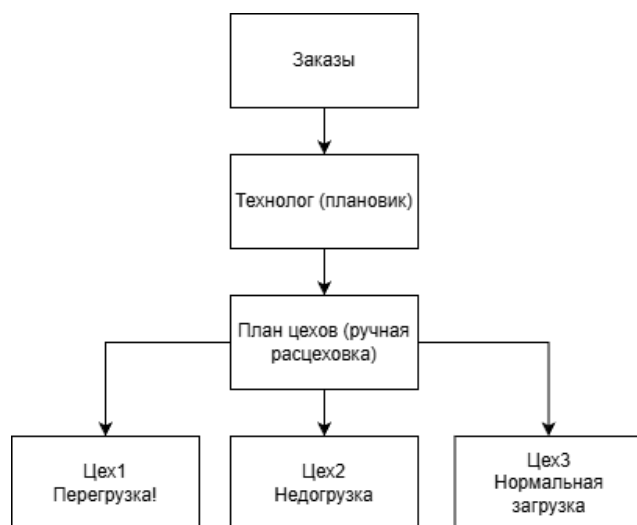


Рис. 1. Традиционная схема расцеховки

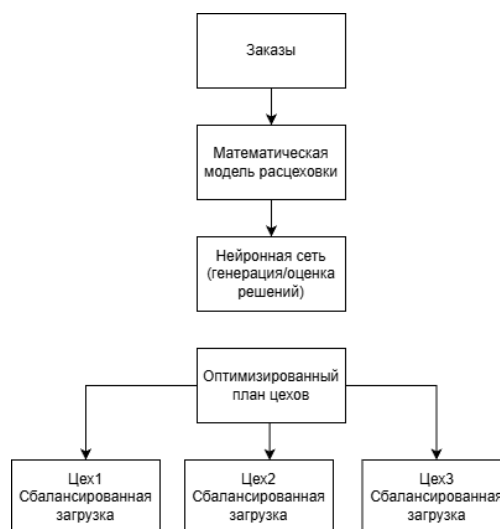


Рис. 2. Расцеховка с использованием нейронных сетей

Существующая схема расцеховки на машиностроительных предприятиях, как правило, основана на последовательном переходе от входного потока заказов к ручному формированию технологами или плановиками плана загрузки цехов. На основе спецификаций изделий и типовых технологических маршрутов специалист, опираясь на опыт и локальные регламенты, распределяет операции по цехам, оценивая доступные мощности и сроки выполнения преимущественно экспертно, без формализованной оптимизационной модели [1].

К достоинствам такой схемы относятся высокая адаптивность к неформализуемым факторам (особенности оборудования, компетенции персонала, текущая обстановка в цехах), возможность оперативно учитывать устные договоренности и другие технологические нюансы, а также относительная простота внедрения, не требующая сложной ИТ-инфраструктуры. Вместе с тем ручная расцеховка обладает существенными недостатками: высокой зависимостью качества планов от квалификации отдельных специалистов, значительными трудозатратами при росте номенклатуры и объемов производства, склонностью к перегрузке одних цехов и недогрузке других, а также ограниченной прозрачностью и воспроизводимостью принимаемых решений, что затрудняет их анализ и дальнейшую автоматизацию [3, 5].

Предлагаемая схема расцеховки основана на совместном использовании формализованной математической модели и нейросетевого модуля, который формирует или оценивает варианты распределения операций по цехам на основе исторических производственных данных. Поток заказов сначала описывается в виде задач математического программирования с ограничениями по мощностям, срокам и технологической последовательности, после чего нейронная сеть либо генерирует приближенное решение, либо ранжирует множество кандидатных планов, позволяя выбрать вариант с более сбалансированной загрузкой цехов и меньшим числом просрочек [2, 8].

Математическая модель рассматривает задачу назначения операций заказов цехам с учетом ограничений по мощностям, срокам и технологической последовательности.

Пусть:

I – множество заказов;

J_i – множество операций заказа $i \in I$;

K – множество цехов;

T – дискретный горизонт планирования (смены/сутки);

p_{ijk} – длительность операции $j \in J_i$ заказа i при выполнении в цехе k ;

c_{kt} – доступная мощность (фонд времени) цеха k в период t ;

d_i – срок готовности заказа i ;

w_i – вес (приоритет) заказа i ;

P_{ij} – множество предшественников операции j заказа i (для технологической последовательности).

Множество допустимых цехов для операции (i, j) обозначим $K_{ij} \subseteq K$ (альтернативные маршруты).

Переменные модели:

x_{ijkt} – операция (i, j) начинается в период t в цехе k .

$x_{ijkt} \in \{0, 1\}$ – момент завершения операции (i, j) .

$C_{ij} \geq 0$ – момент завершения заказа i .

$\delta_i \geq 0$ – величина просрочки заказа i относительно срока d_i .

Дополнительно можно вводить переменные загрузки цехов, например $L_{kt} \geq 0$ – суммарная занятость цеха k в период t .

Целевая функция

Возможный вид целевой функции – минимизация взвешенной суммы просрочек и перегрузок:

$$\min Z = \alpha \sum_{i \in I} w_i \delta_i + \beta \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \max(0, L_{kt} - c_{kt}), \quad (1)$$

где α, β – коэффициенты важности сроков и сбалансированности загрузки.

В линейной постановке вместо $\max(0, L_{kt} - c_{kt})$ вводятся дополнительные неотрицательные переменные $u_{kt} \geq 0$ с ограничениями $u_{kt} \geq L_{kt} - c_{kt}$ и в целевую функцию включается $\sum u_{kt}$.

Ограничения мощности цехов

Сумма загруженности цеха по всем назначенным операциям в каждом периоде не должна превышать доступного фонда либо превышение учитывается как переменная перегрузки:

$$L_{kt} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{\tau \in T} p_{ijk} \cdot a_{t\tau} \cdot x_{ij\tau}, \forall k \in K, t \in T, \quad (2)$$

где $a_{t\tau}$ – доля времени операции, приходящаяся на период t при запуске в период τ (для простоты можно рассматривать p_{ijk} как число периодов и считать, что операция занимает подряд p_{ijk} периодов).

Далее вводятся ограничения:

$$L_{kt} \leq c_{kt} + u_{kt}, u_{kt} \geq 0, \forall k, t. \quad (3)$$

Ограничения единственности назначения

Каждая операция должна быть назначена не более одного раза в один из допустимых цехов и периодов:

$$\sum_{k \in K_{ij}} \sum_{t \in T} x_{ijkt} = 1, \forall i \in I, j \in J_i. \quad (4)$$

Время завершения операций

Если операция (i, j) запускается в период t в цехе k , время завершения можно задать:

$$C_{ij} \geq t + p_{ijk} - M(1 - x_{ijkt}), \forall i, j, k \in K_{ij}, t \in T, \quad (5)$$

где M – достаточно большое число (метод «большого M »).

Технологическая последовательность

Завершение каждой операции не может происходить раньше завершения ее предшественников:

$$C_{ij} \geq C_{ij'} + s_{ij'j}, \forall i \in I, j \in J_i, j' \in P_{ij}, \quad (6)$$

где $s_{ij'j}$ – минимальный технологический интервал (можно принять 0, если промежуток не требуется).

Время завершения заказа и просрочка

Время завершения заказа равно максимальному времени завершения его операций:

$$C_i \geq C_{ij}, \forall i \in I, j \in J_i. \quad (7)$$

Просрочка определяется относительно срока d_i :

$$\delta_i \geq C_i - d_i, \delta_i \geq 0, \forall i \in I. \quad (8)$$

Дополнительные ограничения балансировки

Для более ровного распределения нагрузки между цехами можно ввести отклонение загрузки от средней:

– вычислить целевой средний уровень загрузки по цехам или задать верхние/нижние границы $L_k^{\min}, L_k^{\max}$;

– добавить ограничения вида

$$\sum_{t \in T} L_{kt} \leq L_k^{\max}, \forall k \in K, \quad (9)$$

или симметричные по минимальной загрузке.

Такие ограничения, а также соответствующие штрафы в целевой функции позволяют дополнительно управлять балансом.

Связь модели с нейросетевым модулем

В предлагаемой архитектуре нейросеть не меняет структуру математической модели, она:

– либо генерирует хорошие начальные значения x_{ijkt} (предлагаемые цехи и периоды), после чего модель используется для уточнения и проверки ограничений;

– либо формирует оценки качества вариантов решений (значения Z при разных конфигурациях x_{ijkt}), ускоряя перебор или работу эвристического алгоритма.

Таким образом, математическая модель задает строгую область допустимых решений и критерии оптимальности, а нейронная сеть помогает быстрее находить хорошие комбинации назначений операций цехам в условиях высокой размерности и комбинаторной сложности задачи.

К ключевым достоинствам такой схемы относятся возможность системно учитывать большое число факторов и скрытых закономерностей, накопленных в исторических данных, повышение воспроизводимости и прозрачности принимаемых решений, а также снижение перегрузки отдельных цехов за счет более равномерного распределения операций. Кроме того, интеграция в цифровой контур управления производством создает основу для автоматизированного пересчета планов при изменении входных условий и для последующей расширяемости решения.

К недостаткам можно отнести необходимость наличия достаточного объема качественных данных для обучения нейронной сети, дополнительные требования к вычислительным ресурсам и ИТ-инфраструктуре, а также сложность валидации и интерпретации нейросетевых решений для производственных специалистов, что требует поэтапного внедрения и настройки [8].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нейронные сети в АСТПП машиностроительного производства / С.Г. Селиванов, С.Н. Поезжалова, О.А. Бородкина [и др.] // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2012. – № 4. – С. 59–71. – EDN PZFTYL.
2. Сочнев, А.Н. Применение искусственной нейронной сети для решения задач оптимизации производства на основе цифровых двойников / А.Н. Сочнев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 9. – С. 759–766. – DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-9-759-766. – EDN ZKLJSU.
3. Овсянкин, А.К. Анализ методов и алгоритмов оптимизации планирования производственных мощностей / А.К. Овсянкин, А.М. Попов, М.А. Казанцев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2025. – № 3. – С. 88–93. – DOI: 10.24143/2072-9502-2025-3-88-93. – EDN ESSYOL.
4. Акинцева, А.В. Применение искусственного интеллекта в задачах оптимизации режимов резания и прогнозирования точности обработки для нестабильных условий обработки партии деталей на станках с ЧПУ / А.В. Акинцева, П.П. Переверзев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 52–63. – DOI: 10.14529/engin220205. – EDN IXZRRY.
5. Использование методов искусственного интеллекта в технологической подготовке машиностроительного производства / С.Г. Селиванов, В.В. Никитин, С.Н. Поезжалова, М.В. Селиванова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 1 (36). – С. 87–97. – EDN PWZSTZ.
6. Якименко, И. Искусственный интеллект в машиностроении / И. Якименко // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2024. – Т. 20, № 3. – С. 45–58.
7. Колдин, М.С. Анализ возможностей искусственного интеллекта в машиностроении / М.С. Колдин // Вестник Мичуринского ГАУ. – 2025. – Т. 17, № 2. – С. 120–130.
8. Стихаенко, Р.М. Внедрение искусственного интеллекта в машиностроение: текущее состояние и перспективы / Р.М. Стихаенко // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 8. – С. 210–220.
9. Кузнецова, Т.И. Нейросетевое моделирование производственных процессов в машиностроительной отрасли / Т.И. Кузнецова // Инженерный вестник. – 2018. – № 6. – С. 55–63.
10. Machine Learning in Manufacturing: Review, Synthesis, and Theoretical Framework / E. Jantunen [et al.] // Journal of Manufacturing Technology Management. – 2020. – Vol. 31. – No. 5. – Pp. 977–1003.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПОВ ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ В NX CAM ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «КРЫШКА ГИДРОЦИЛИНДРА»

Горяинов Д.С. , к.т.н., доцент, **Балашов И.В.**, магистрант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: tmsi@samgtu.ru

Показана реализация метода групповой обработки деталей типа «крышка гидроцилиндра» в NX CAM путем разработки и применения шаблона операции с ЧПУ технологического процесса (ТП). После отбора обрабатываемых деталей в группу был проведен анализ геометрических моделей деталей и разработана библиотека конструкторско-технологических элементов (КТЭ). Для каждого КТЭ разработаны технологические переходы обработки в NX CAM. Показан подбор инструмента и режимов обработки. Переходы обработки были сформированы в шаблон, который может быть применен к новой детали группы, что ускоряет разработку ТП. Предлагаемый способ реализации групповой обработки в NX CAM может быть использован на предприятиях машиностроительной отрасли для унификации процессов обработки и повышения производительности труда технологов – программистов ЧПУ.

Ключевые слова: групповой технологический процесс, ЧПУ, шаблон, NX CAM

IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLES OF GROUP TECHNOLOGY IN THE CNC TECHNOLOGICAL PROCESSES DEVELOPMENT IN A NX CAM FOR MACHINING PARTS OF THE “HYDRAULIC CYLINDER COVER” TYPE

Goryainov D.S. , PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Balashov I.V., Master's Degree student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: tmsi@samgtu.ru

The implementation of the method of group machining of parts of the “Hydraulic cylinder cover” type in NX CAM is shown by developing and applying a template for a CNC process operation. After selecting the processed parts in the group, the geometric models of the parts were analyzed and a library of features was developed. Technological transitions of processing in the NX CAM have been developed for each feature. The selection of tools and processing modes is shown. The processing transitions have been formed into a template that can be applied to a new part of the group, which speeds up the development of the TP. The developed method of implementing group processing in NX CAM can be used at enterprises of the machine-building industry to unify processing processes and increase the productivity of CNC technologists and programmers.

Keywords: group technological process, CNC, template, NX CAM

Одним из путей повышения эффективности путем унификации подходов к разработке ТП является применение метода групповой технологии [1]. Основу метода составляет группирование деталей по принципу схожести технологических методов обработки или применяемому оборудованию. Условным объектом обработки выступает конструкторско-технологический элемент (КТЭ), представляющий собой определенную группу граней детали, с которой однозначно связан один или несколько технологических переходов обработки. Отличительными особенностями КТЭ являются однозначное отнесение его к определенному классу на основе библиотеки КТЭ и наличие в КТЭ параметров, например, диаметр и глубина отверстия, а также точность и шероховатость [2].

Большинство современных САМ-систем имеют функционал работы с КТЭ, а именно могут распознать в модели детали КТЭ и предложить для распознанного КТЭ план обработки. Однако получение на основе конструкторской модели детали описания в виде совокупности КТЭ, к тому же учитывающих очередность выполнения, представляет собой задачу, сложно поддающуюся автоматизации. Сложность состоит прежде всего в неоднозначности распознавания – одна и та же группа граней может быть отнесена к разным классам библиотеки КТЭ. Снизить «размерность» задачи распознавания КТЭ можно, настроив библиотеку КТЭ на определенные наборы граней, характерные для группы деталей. Для этого нужно отобрать детали в группу и провести анализ конструктивных и технологических особенностей деталей. Эту работу выполняет технолог. Операцию автоматизированного распознавания выполняет САМ-система.

В современном машиностроении доля обработки на станках с ЧПУ увеличивается. При разработке ТП все чаще применяются операционные модели (заготовки), описывающие состояние заготовки на момент окончания операции обработки. Таким образом, операционные модели можно представить как аналог операционных эскизов при классической разработке ТП. Создание таких моделей может быть еще одним путем улучшения качества распознавания.

Важным вопросом является способность автоматизированной системы распознавать КТЭ; иметь возможность редактирования библиотеки КТЭ и соответствующих им переходов обработки, а также библиотеки инструментов; сохранять структуру ТП в виде шаблона и применять его к новой детали. Для решения этих задач был выбран NX CAM [4].

Была проанализирована группа деталей типа «крышка гидроцилиндра» (рис. 1).

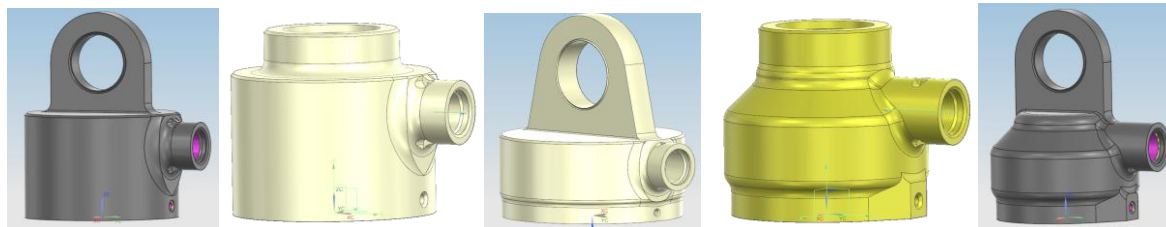


Рис. 1. Отобранные модели деталей группы

Детали отличаются тем, что имеют токарные, сверлильные и фрезерные переходы обработки. После анализа для удобства была разработана комплексная деталь (рис. 2), для которой был создан ТП обработки (рис. 3).

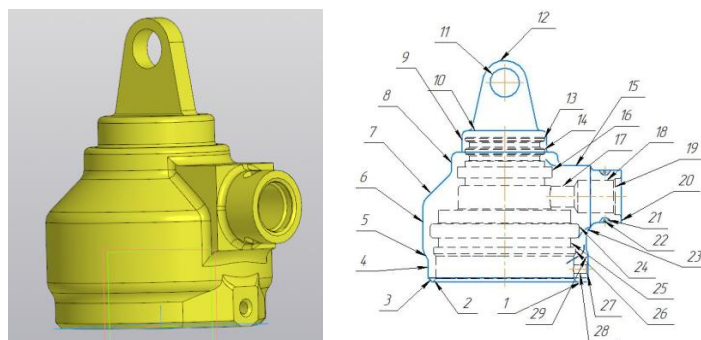


Рис. 2. Пример модели комплексной детали и ее технологический чертеж

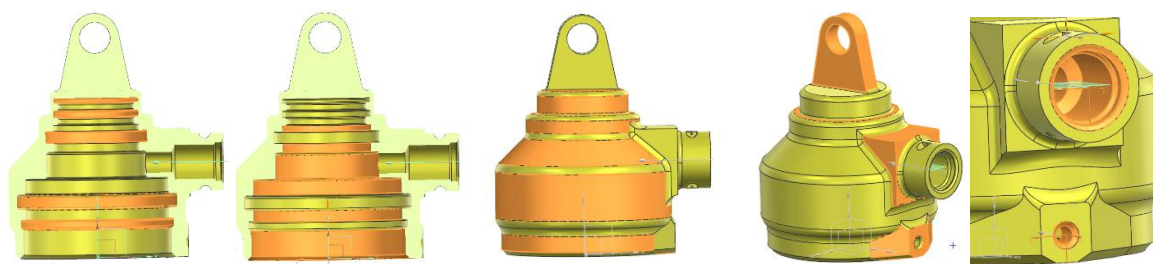


Рис. 3. Пример граней комплексной детали, формирующих КТЭ

Структура операций обработки комплексной детали была разработана в *NX CAM*. В проекте операции определен объект *WORKPIECE*, задающий обрабатываемую деталь и заготовку. Установы и положение систем координат для операций с ЧПУ были заданы на Виде Геометрии. Также на Виде Геометрии КТЭ были заданы как объекты *MILL_GEOM*. Был выбран и задан инструмент, а также назначены режимы обработки.

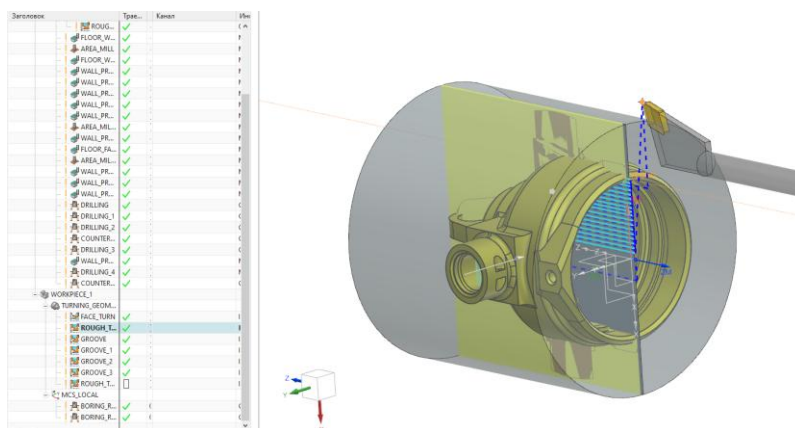


Рис. 4. Структура операций и визуализация обработки модели детали на станке с ЧПУ

Полученный файл проекта обработки был сохранен как шаблон (рис. 4) для применения к новым деталям группы. В состав шаблона вошли: установки, системы координат и объекты геометрии; перечень инструментов; все переходы обработки.

Создание нового проекта обработки новой детали с применением разработанного шаблона заключалась в том, что КТЭ на новой детали частично распознавались автоматизировано, а частично определялись технологом как группа граней объекта *MILL_GEOM*. После чего оставалось сгенерировать прикрепленные к этому объекту переходы обработки. Разработанный шаблон и сам принцип применения шаблонов на основе групповой технологии позволяет повысить скорость разработки ТП на станках с ЧПУ; унифицировать подходы к разработке ТП; снизить влияние человеческого фактора и количество ошибок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Митрофанов, С.П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2-х т. / С.П. Митрофанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, 1983. – Т. 1: Организация группового производства. – 407 с.; Т. 2: Проектирование и использование технологической оснастки металлорежущих станков. – 376 с.
2. Петухов, А.В. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов: учеб. пособие / А.В. Петухов, Д.В. Мельников, В.М. Быстренков. – Гомель: Гомельский гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого, 2011. – 144 с.
3. Шаблон проекта обработки типовых деталей в *NX CAM* [Электронный ресурс]. – URL: <https://dzen.ru/video/watch/658994953c349263cd5967b518389966824187664931> (дата обращения: 18.06.2025).
4. Ведмидь, П.А. Программирование обработки в *NX CAM* / П.А. Ведмидь, А.В. Сулинов. – Москва: ДМК Пресс, 2014. – 304 с.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ НА ОСНОВЕ ЕЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Горяинов Д.С.✉, к.т.н., доцент, Удовик А.Е., магистрант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: tmsi@samgtu.ru

Рассмотрен способ оценки себестоимости обработки детали на основе ее геометрической модели. Способ заключается в том, что на модели детали распознаются конструкторско-технологические элементы; определяются их параметры; на автоматизированной основе подбираются переходы их обработки и определяется себестоимость обработки. Способ не учитывает некоторые составляющие себестоимости (либо их можно учесть укрупненно), однако позволяет с приемлемой точностью прогнозировать технологическую себестоимость. Способ может быть применен для ускоренного технико-экономического сравнения вариантов технологического решения и в целом повышает производительности труда технологов.

Ключевые слова: конструкторско-технологический элемент, себестоимость, ЧПУ

FORECASTING THE COST OF PROCESSING A PART BASED ON ITS GEOMETRIC MODEL

Goryainov D.S.✉, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Udovik A.E., Master's Degree student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: tmsi@samgtu.ru

A method for estimating the cost of processing a part based on its geometric model is considered. The method consists in recognizing design and technological elements on the part model; their parameters are determined; the transitions of their processing are selected automatically and the cost of processing is determined. The method does not take into account some components of the cost, or they can be taken into account in an aggregated manner, however, it allows predicting the technological cost with acceptable accuracy. The method can be used for accelerated technical and economic comparison of technological solutions. In general, it increases the productivity of technologists.

Keywords: feature, cost price, CNC

В условиях усиления конкуренции и необходимости оптимизации производственных процессов особую значимость приобретает разработка точных и оперативных методов расчета себестоимости механической обработки деталей.

Проведен анализ методов расчета себестоимости производства изделий [1, 2]. Наиболее применяемые:

- нормативный – основан на пооперационном нормировании трудоемкости обработки с применением значений тарифных ставок и норм расхода материала. Наиболее часто применяемый метод в серийном производстве;
- позаказный – основан на отдельном расчете на каждый заказ с отдельным учетом прямых/косвенных затрат. Эффективен в единичном производстве;
- параметрический – основан на статистических зависимостях между параметрами изделия и его себестоимостью. Эффективен в крупносерийном производстве;
- на основе CAD-модели – основан на оценке разницы объемов заготовки и конечной детали и наличии в детали конструкторско-технологических элементов (КТЭ). Метод может базироваться на нескольких подходах, которые могут использовать в том числе машинное обучение.

В современном производстве необходимо быстро оценивать и рассчитывать себестоимость решения технолога, выбирая наиболее рациональный вариант технологического процесса (ТП), особенно в условиях с переменным размером заказа или партии выпуска. Традиционные подходы, основанные на экспертных оценках и ручных расчетах, обладают недостатками: высокой трудоемкостью, субъективностью и недостаточной точностью. Показано применение метода прогнозирования себестоимости механической обработки на основе анализа геометрических параметров детали. Для формализации геометрических признаков детали предложен метод автоматизированного распознавания КТЭ. КТЭ – это группа граней, обозначающих конструкторский элемент, которым могут быть поставлены в соответствие переходы обработки. Часто бывает, что КТЭ может быть обработан путем применения нескольких конкурирующих вариантов. В этом случае требуется оценка по дополнительным параметрам.

Последовательность определения технологической себестоимости выглядит так (рис. 1):

1. Импорт и анализ конструкторской САД-модели. На этом этапе технолог может снизить число вариантов построения ТП, определив самостоятельно установки и/или позиции заготовки при обработке. Такая предварительная проработка может устранить неоднозначность автоматизированного выбора вектора доступа инструмента к КТЭ.

2. Распознавание КТЭ. Может быть применено (см. рис. 1) прямое чтение дерева построения конструкторской САД-модели и выделения из него операций, например, типа «Отверстие». Может быть использовано определение КТЭ технологом, как это делается в некоторых САПР-ТП или САМ-системах. Также применяется автоматизированное распознавание КТЭ. Помимо самого распознавания необходимо построить иерархию КТЭ, определяющих очередность переходов.

3. Расчет параметров для каждого элемента. После извлечения каждого КТЭ автоматически определяются его параметры: геометрические, например, диаметр и глубина отверстия, и негеометрические – точность и шероховатость.

4. Определение требуемых операций обработки. На основе логических правил к КТЭ применяются библиотечные переходы обработки, инструмент и оснастка с формированием конкретного перехода обработки и/или операции.

5. Расчет стоимости по операциям. На основе примененных режимов обработки рассчитывается время обработки и вычисляется технологическая себестоимость.

6. Суммирование затрат с учетом поправочных коэффициентов.

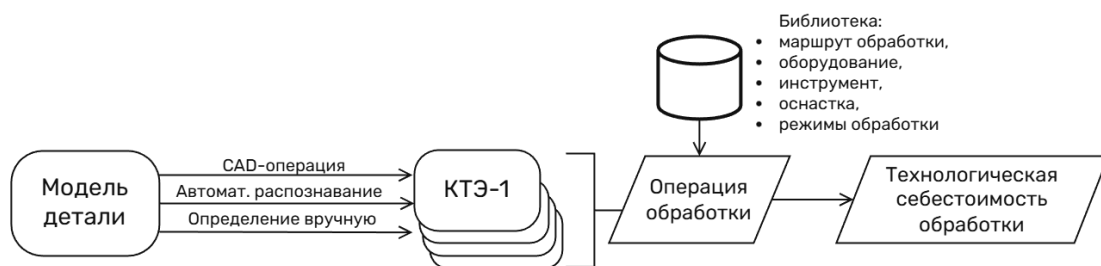


Рис. 1. Схема определения себестоимости на основе САД-модели детали

Разработана математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между параметрами КТЭ и технологическими операциями. Модель базируется на декомпозиции детали на КТЭ с последующим расчетом себестоимости обработки для каждого элемента и их последующим суммированием. Для каждого технологического элемента стоимость обработки определяется по формуле

$$C_i = (\alpha \cdot V_i + \beta \cdot S_i + \gamma \cdot K_{сл_i}) \cdot T_{ст} + C_{инст_i} + C_{мат_i},$$

где V_i – объем удаляемого материала элемента;
 S_i – площадь обрабатываемой поверхности;
 $K_{сл_i}$ – коэффициент сложности обработки;
 $T_{ст}$ – стоимость станко-часа;

Синст_i – затраты на инструмент;

Смат_i – стоимость материала;

α , β , γ – весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты α , β , γ были приняты на основе справочных данных [3].

Ключевыми особенностями разработанной модели являются:

- возможность настройки модели изменением весовых коэффициентов в зависимости от изменения входных параметров;
- учет технологических ограничений и взаимного влияния КТЭ;
- возможность настройки параметров модели под конкретное оборудование и технологические процессы;
- периодическая актуализация коэффициентов на основе накапливаемых производственных данных;
- поддержка стандартных форматов обмена данными (STEP).

Проведен сравнительный расчет технологической себестоимости нормативным методом для верификации модели детали «Корпус» (рис. 2). Сравнительный расчет показал приемлемую точность себестоимости, рассчитанную на основе CAD-модели и отличающуюся от рассчитанной нормативным методом не более чем на 15 %.

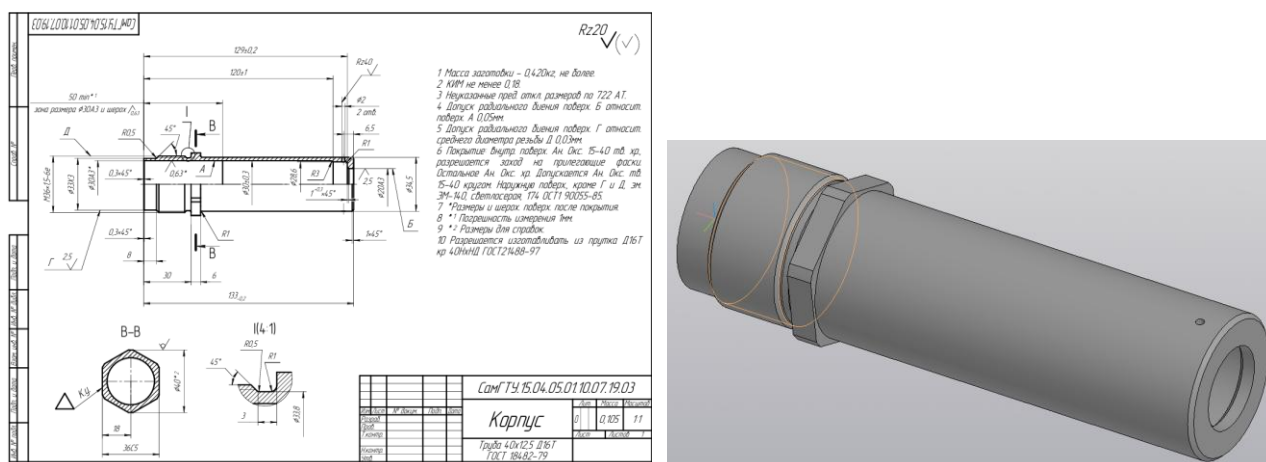


Рис. 2. Чертеж и модель детали, для которой определялась технологическая себестоимость

Анализ результатов показал, что основными источниками погрешностей являются: неправильное изначальное задание технологом ориентации заготовки на установке или вектора доступа к КТЭ; неоднозначность и ошибки при автоматизированном распознавании КТЭ. Расчет технологической себестоимости осложняется еще и тем, что требуется настройка библиотеки КТЭ и моделей распознавания; существует достаточно широкий диапазон возможных режимов обработки, значительно влияющих на время обработки; также возможны ошибки в определении начальных значений весовых коэффициентов модели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Капустин, Н.М. Автоматизация расчетов технологической себестоимости / Н.М. Капустин. – Москва: Машиностроение, 2020.
2. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – Т. 2. – Москва: Машиностроение, 1986. – 656 с.
3. Общемашиностроительные нормативы времени вспомогательного, на обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного на работы, выполняемые на металлорежущих станках. Среднесерийное и крупносерийное производство. – Москва: Машиностроение, 1974. – 421 с.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА НА МАКРОГЕОМЕТРИЮ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Гордиенко Я.М., к.т.н., ведущий инженер, Гришин Р.Г., доцент, к.т.н., доцент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: grg-s1@mail.ru

Представлены результаты моделирования поверхности, обработанной шлифованием, в зависимости от количества режущих элементов прерывистого шлифовального круга. Рассчитано оптимальное количество режущих элементов по критерию геометрических параметров обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: моделирование, режущий элемент, прерывистый шлифовальный круг, срезаемый слой, макрогеометрия поверхности

INFLUENCE OF THE NUMBER OF CUTTING ELEMENTS OF A DISCONTINUOUS GRINDING WHEEL ON THE MACROGEOMETRY OF THE MACHINED SURFACE

Gordienko Y.M., PhD in Engineering Sciences, lead engineer,
Grishin R.G., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: grg-s1@mail.ru

The results of modeling a ground surface based on the number of cutting elements of an interrupted grinding wheel are presented. The optimal number of cutting elements is calculated based on the geometric parameters of the machined surface

Keywords: modeling, cutting element, interrupted grinding wheel, cut-off layer, surface macrogeometry

Для определения конструктивных параметров шлифовального круга необходимо в первую очередь установить ограничения, обусловленные требованиями нормативной документации, геометрическими характеристиками и целевыми функциями. При выборе таких параметров, как радиус круга R , ширина сегмента $b_{\text{сегм}}$ и диаметр d , следует руководствоваться положениями ГОСТ Р 52781-2007. Кроме того, применение стандартных абразивных брусков в качестве заготовок для изготовления сегментов требует соблюдения ограничений по их геометрическим размерам, установленных в ГОСТ 33534-2015.

В целях упрощения технологии изготовления и последующего восстановления абразивных сегментов предполагается, что поперечное сечение исходных брусков не изменяется. В связи с этим должны выполняться следующие условия: ширина сегмента $b_{\text{сегм}}$ равна ширине бруска b , высота сегмента $h_{\text{сегм}}$ – высоте бруска h , а длина сегмента $l_{\text{сегм}}$ не превышает длины бруска l (все размеры указаны в миллиметрах).

Поскольку на величину $b_{\text{сегм}}$ влияют также требования, регламентируемые стандартом ГОСТ Р 52781-2007, необходимо обеспечить выполнение равенства

$$b_{\text{сегм}} = b = b_{\text{ст}},$$

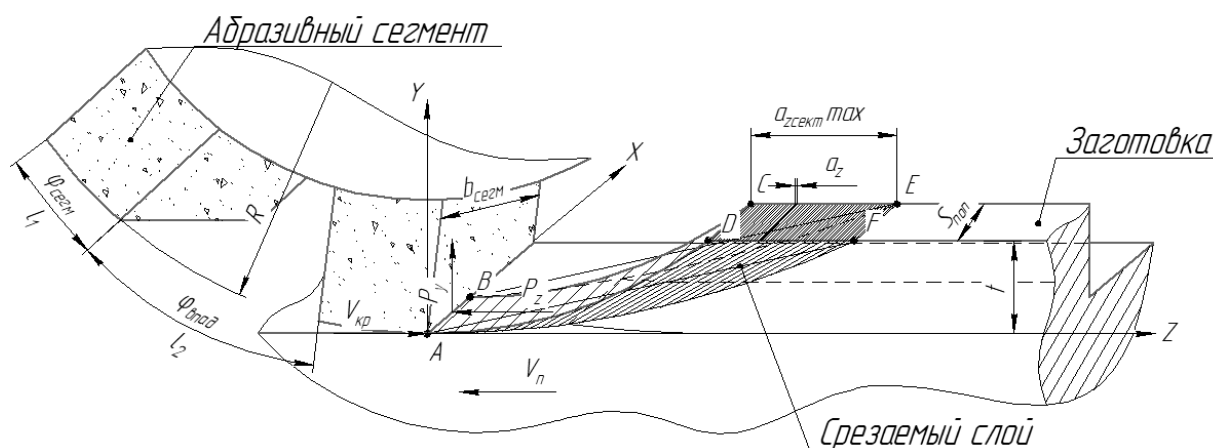
где $b_{\text{ст}}$ – стандартная ширина (высота) шлифовального круга в мм по ГОСТ Р 52781-2007.

Из-за необходимости обеспечения надежного закрепления абразивных сегментов в корпусе круга на минимальное значение параметра $l_{уст}$ накладываются определенные ограничения, поэтому можно принять, что $l_{уст} = \text{const}$, и, следовательно, данный параметр можно рассматривать как неуправляемый.

Таким образом, определение значений переменных, описывающих конструктивные параметры шлифовального круга, сводится к установлению таких характеристик, как длина сегмента $l_{сегм}$ и их количество $n_{сегм}$. При этом необходимо учитывать ограничения, возникающие в результате взаимного влияния областей решения функций критериев совершенствования процесса.

Согласно результатам экспериментальных исследований, уменьшение числа абразивных сегментов $n_{сегм} \rightarrow \min$ при прочих равных условиях приводит к снижению температуры в зоне резания $T_{рез} \rightarrow \min$. Однако данное изменение сопровождается увеличением амплитуды вынужденных колебаний в технологической системе $A_{рез}$ и ухудшением качества обработанной поверхности, что противоречит общей цели совершенствования процесса обработки.

Для описания методики поиска оптимальных значений параметров $l_{сегм}$ и $n_{сегм}$ рассмотрим схему прерывистого шлифования, представленную на рис. 1. Анализ кинематики процесса прерывистого шлифования позволяет реализовать одну из двух возможных схем контакта рабочей поверхности круга с заготовкой – с прерывистым или непрерывным контактом. При непрерывном контакте врезание каждого последующего абразивного сегмента происходит до момента выхода из контакта с заготовкой предыдущего сегмента. В случае прерывистого контакта врезание кромки последующего сегмента осуществляется после полного выхода из контакта с заготовкой предыдущего сегмента.



В соответствии с ограничениями, установленными в [4], заданы следующие режимные параметры обработки: скорость круга $V_{кр} = 20\text{--}30$ м/с, скорость продольной подачи $V_{пр} = 0,05\text{--}0,25$ м/с. На основе этих данных выполнен расчет количества абразивных сегментов, обеспечивающего выполнение условия непрерывности контакта рабочей поверхности круга с заготовкой. Результаты расчета в виде зависимости $n = f(V_{кр}, V_{пр}, R, \phi_{сегм})$ для указанных условий представлены на рис. 2.

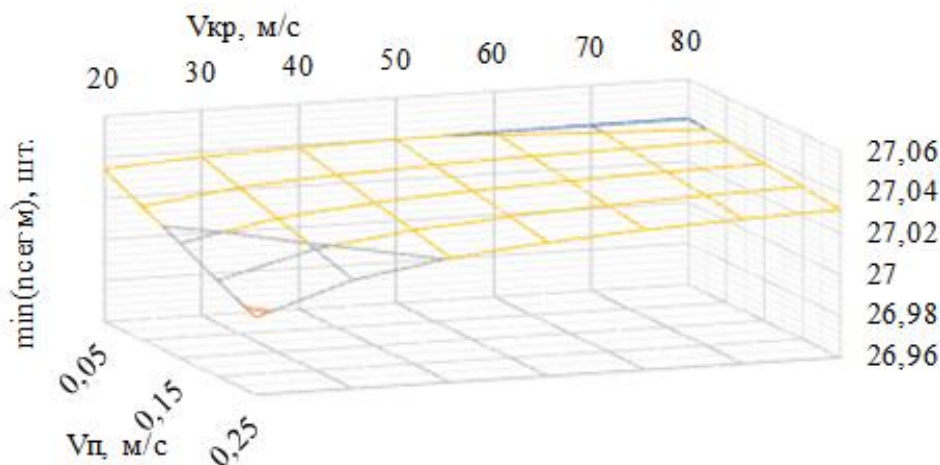


Рис. 2. Зависимость минимального количества сегментов $n_{сегм}$ от параметров t , $V_{кр}$, $V_{пр}$, R , $\phi_{сегм}$ по условию непрерывности контакта рабочей поверхности периферии круга с поверхностью заготовки

Таким образом, в рассматриваемом диапазоне параметров обработки условие непрерывности контакта рабочей поверхности круга с заготовкой обеспечивается при количестве абразивных сегментов $n_{сегм} > 27$ шт. Опираясь на результаты ранее выполненных исследований [2, 3], примем произвольный диапазон значений числа сегментов $n_{сегм} = 10\text{--}32$ шт., который охватывает области как прерывистого, так и непрерывного контакта рабочей поверхности круга с заготовкой. Для указанного диапазона построена зависимость максимальной длины сегмента от их количества $\max(l_{сегм}) = f(n_{сегм})$ при $R = 0,1$ м и $\phi_{сегм} = 11,5^\circ$, представленная на рис. 3. Также отражено влияние рассматриваемых геометрических параметров на целевые критерии совершенствования процесса прерывистого шлифования титановых сплавов (при неизменных значениях остальных параметров).

Анализ графика, приведенного на рис. 3, показывает, что при увеличении числа абразивных сегментов свыше $n_{сегм} = 16$ дальнейший рост их количества приводит к уменьшению допустимой длины сегмента вплоть до отрицательных значений. Это свидетельствует о невозможности изготовления абразивных сегментов при данных параметрах. Возникает ситуация взаимоисключающих условий: с одной стороны, уменьшение числа абразивных сегментов способствует снижению температуры в зоне резания (что подтверждается результатами предыдущих исследований) и повышению значений зависимой функции наработки круга; с другой стороны, это может привести к ухудшению динамики технологической системы и увеличению составляющей высоты волнистости, обусловленной прерывистостью процесса резания.

При прочих равных условиях минимизация количества сегментов $n_{сегм} \rightarrow \min$ способствует снижению времени резания $T_{з,рез} \rightarrow \min$, тогда как увеличение длины сегмента $l_{сегм} \rightarrow \max$ $N_{дет} \rightarrow \max$ ведет к росту числа отмеченных импульсов $N_{отм}$. В связи с этим уточнение значений $l_{сегм}$ и $n_{сегм}$ необходимо проводить с учетом их воздействия на остальные зависимые параметры процесса – выходную высоту волнистости y_b и показатель производительности обработки $A_{рег}$.

В настоящем разделе более детально исследуется теоретическая связь между числом режущих элементов $n_{сегм}$ и составляющей высоты волнистости $y_b(y_{пр})$. Для этого в диапазоне изменения $n_{сегм}$ от 10 до 28 с шагом 2 шт. были построены зависимости $y_{пр} = f(n_{сегм}, V_n)$, $y_{пр} = f(n_{сегм}, V_{кр})$ и $y_{пр} = f(V_n, V_{кр})$ при амплитуде $A = 0$, скорости круга $V_{кр}$ от 20 до 80 м/с

и продольной подаче V_n в интервале 0,05–0,25 м/с. Полученные результаты отражены на рис. 4. Анализ представленных графиков показывает, что в исследуемых диапазонах изменения режимов обработки снижение числа режущих элементов, окружной скорости круга и величины подачи до минимальных значений сопровождается увеличением составляющей волнистости, обусловленной дискретным характером резания. В то же время при возрастании количества абразивных сегментов, скорости продольной подачи и окружной скорости круга наблюдается сглаживание графиков, что указывает на ослабление влияния изменения данных параметров на величину $u_{пр}$.

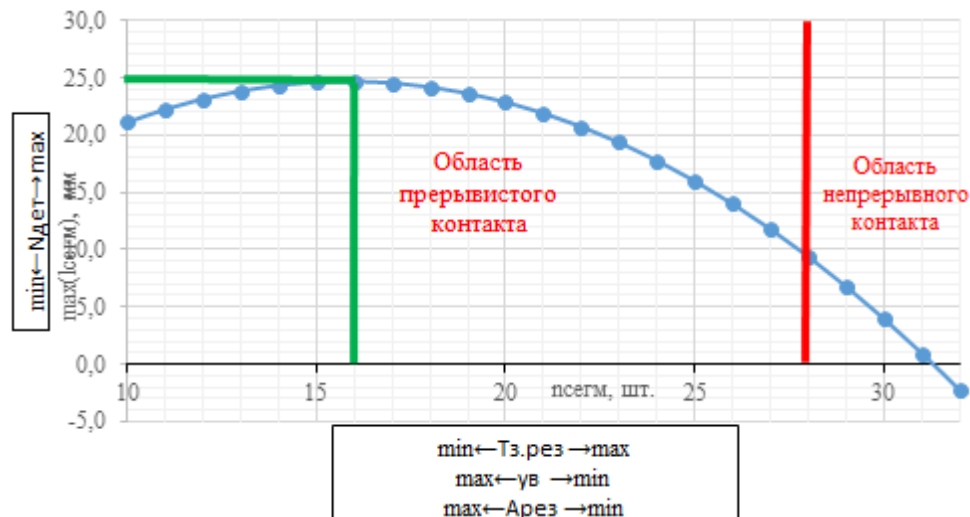


Рис. 3. График зависимости $\max(l_{\text{сегм}}) = f(n_{\text{сегм}})$ при $R = 0,1$ м, $b_{\text{сегм}} \times h_{\text{сегм}} = 30 \times 20$ мм

Поскольку в структуру функции, описывающей составляющую высоты волнистости, связанную с дискретностью резания, входят как частично регулируемые ($n_{\text{сегм}}$), так и полностью управляемые параметры (V_n , $V_{кр}$), применение предложенного показателя позволяет определить области технологической системы, в которых изменение $u_{пр}$ целесообразно осуществлять за счет конструктивных особенностей инструмента, и области, в которых это рационально делать путем корректировки режимов обработки.

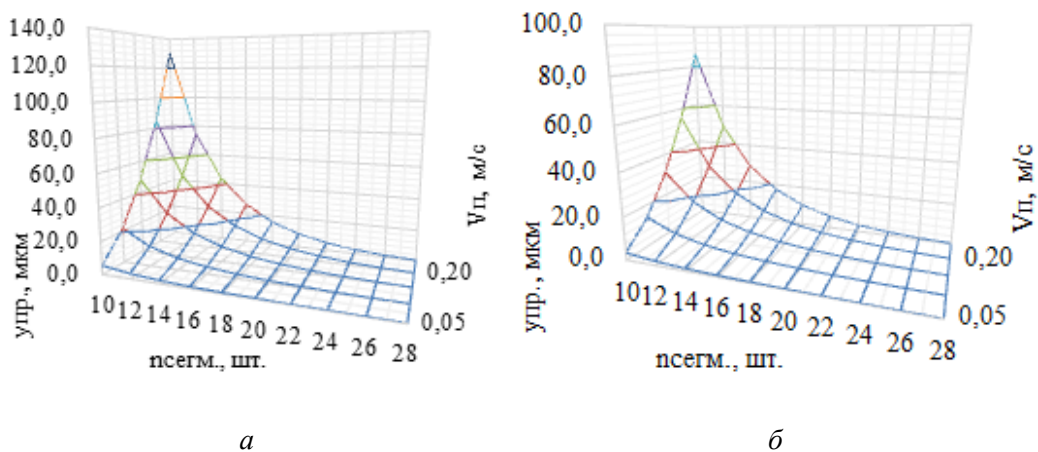


Рис. 4. Зависимости составляющей волнистости $u_{пр}$ от продольной подачи V_n и количества сегментов $n_{\text{сегм}}$ при $A = 0$ м:
а – $V_{кр} = 20$ м/с, б – $V_{кр} = 80$ м/с

На основе ранее полученных значений составляющей волнистости, обусловленной прерывистым характером резания, были построены контурные графики зависимости $\eta_j = f(n_{\text{сегм}}, V_{кр})$ для двух предельных значений продольной подачи: $V_n = 0,05$ м/с и $V_n = 0,25$ м/с. Результаты представлены на рис. 5.

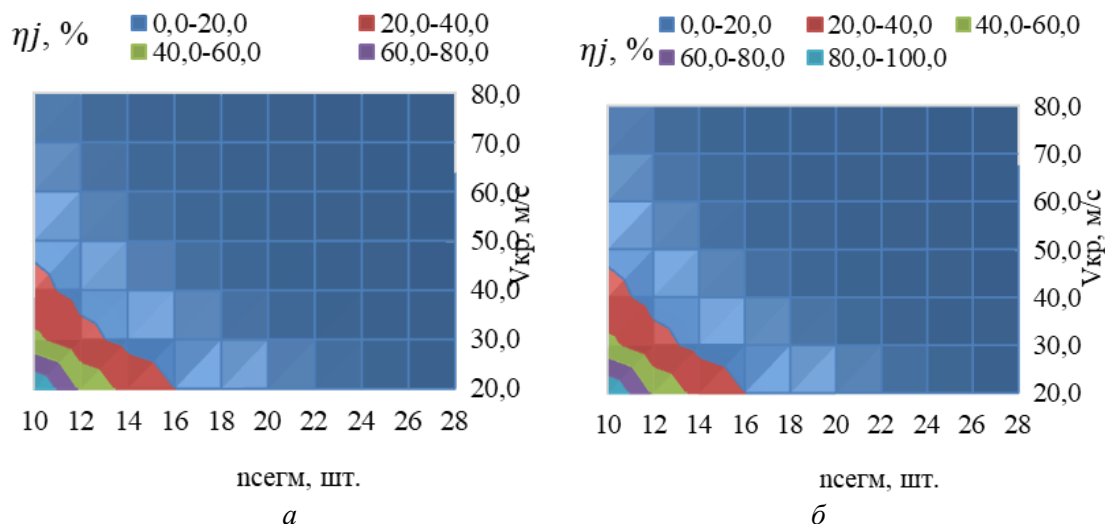


Рис. 5. Графики функции $\eta_j = f(n_{\text{сегм}}, V_{\text{кр}})$ при следующих параметрах:
 $a - V_{\text{пр}} = 0,05 \text{ м/с}$, $b - V_{\text{пр}} = 0,25 \text{ м/с}$

Анализ представленных зависимостей показывает, что в исследуемых условиях обработки наблюдается выраженное разделение диапазонов числа абразивных сегментов по степени их влияния на величину $u_{\text{пр}}$. С практической точки зрения выбор $n_{\text{сегм}}$ на основе параметра η_j может быть осуществлен с использованием принципа Парето, согласно которому 80 % снижения максимального значения составляющей волнистости достигается за счет увеличения числа сегментов, а оставшиеся 20 % (в области незначительного влияния $n_{\text{сегм}}$ на $u_{\text{пр}}$) – путем изменения режимных параметров. Такой подход позволяет расширить диапазон регулирования технологических режимов и минимизировать возможные противоречия между целевыми функциями.

В рассматриваемом примере при $n_{\text{сегм}} \geq 16$ шт. относительная высота волнистости во всем исследуемом интервале V_n и $V_{\text{кр}}$ не превышает 20 %, что подтверждает выполнение указанного принципа. При этом окончательный выбор значения $n_{\text{сегм}}$ должен производиться с учетом обеспечения более приоритетного условия $T_{\text{з,рез}} < T_{\text{ф,пер}}$, необходимого для достижения заданных параметров качества поверхности – допустимой высоты волнистости $[h_v]$ и шероховатости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнов, В.А. Повышение эффективности плоского шлифования периферией круга за счет использования прерывистых кругов с упругодемпфирующими элементами: специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки»: дис. ... канд. техн. наук / Смирнов Виталий Алексеевич. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет, 2008. – 140 с.
2. Якимов, А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. – Киев; Одесса: Вища школа, 1986. – 176 с.
3. Trunga, D.D. Application of TOPSIS Method in Multi-Objective Optimization of the Grinding Process Using Segmented Grinding Wheel / D.D. Trunga, N.V. Thiena, N.T. Nguyena. – Текст: непосредственный // Tribology in Industry. – 2021. – Vol. 43. – No. 1. – Pp. 12–22.

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ САМОУСТАНОВЛИВАЮЩЕГОСЯ МЕХАНИЗМА МЕТОДОМ FUSED DEPOSITION MODELING

Гудимова Л.Н. , к.т.н., доцент, Леммермайер Д.А., магистрант

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Российская Федерация
E-mail: lyu-gudiova@yandex.ru*

В статье приведены теория возникновения избыточных связей в шарнирных механизмах и метод полного и частичного их устранения. Показан пример создания физической модели шестизвенового механизма методом FDM 3D-печати с целью дальнейшего изучения влияния избыточных связей на работоспособность плоских механизмов.

Ключевые слова: самоустанавливающийся механизм, 3D-печать, избыточные связи, структурный синтез, звено, кинематическая пара

STRUCTURAL SYNTHESIS, MODELING, AND FABRICATION OF A SELF-ASSEMBLING MECHANISM USING FDM 3D PRINTING

Gudimova L.N. , PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Lemmermeyer D.A., Master's Degree student

*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation
E-mail: lyu-gudiova@yandex.ru*

The article presents a theory on the origin of redundant constraints in hinged mechanisms, along with methods for their complete and partial elimination. An example of creating a physical model of a six-bar mechanism using FDM 3D printing is shown, with the aim of further studying the influence of redundant constraints on the performance of planar mechanisms.

Keywords: self-assembling mechanism, 3D printing, redundant links, structural synthesis, link, kinematic pair

Современное развитие машиностроения и робототехники сопровождается возрастающими требованиями к точности и надежности кинематических систем. Одним из факторов, существенно влияющих на эксплуатационные характеристики механизмов, является наличие избыточных связей, приводящих к повышенным внутренним нагрузкам и ускоренному износу шарниров. В этой связи особый интерес представляет проектирование самоустанавливающихся механизмов, которые благодаря особенностям своей структуры способны компенсировать неточности сборки и геометрические отклонения при изготовлении. Использование современных инженерных инструментов (SolidWorks, T-Flex CAD, ANSYS и других программных пакетов) открывает новые возможности для детального анализа кинематики и динамики механизмов, обеспечивая предварительное тестирование физических моделей еще до начала производственного изготовления. Благодаря инструментам виртуальной сборки и динамического моделирования инженеры получают уникальную возможность заранее выявить недостатки при работе механизма и внести изменения непосредственно на этапе проектирования, минимизируя риски последующих этапов сборки и эксплуатации. Широкое внедрение аддитивных технологий, таких как FDM-принтеры, существенно расширяют возможности быстрого перехода от концепции к физическим прототипам, позволяя оперативно проверять функциональные свойства предлагаемых структурных схем механизмов. Развитие этих технологий обеспечивает новый уровень интеграции этапов «структурный синтез – моделирование – изготовление».

В данной работе поставлена и решена задача разработки технологического процесса создания 3D-печатного прототипа самоустанавливающегося механизма с охватом этапов структурного синтеза, численного моделирования и практической реализации.

Избыточные связи, возникающие в шарнирных механизмах, представляют собой определенные ограничения в движении звеньев, которые не изменяют подвижность механизма, но оказывают существенное влияние на его эксплуатационные характеристики. Согласно исследованиям Н.И. Колчина [1], все механизмы, не относящиеся к ненулевому семейству, содержат избыточные связи, которые ранее В.В. Добровольский [2] не совсем корректно классифицировал как «пассивные», однако полученная им формула (1) для определения их числа в зависимости от отношения механизма к определенному семейству оставляет сомнения в том, что это связи, которые в современном понимании принято называть избыточными:

$$s = m(\sum p - n), \quad (1)$$

где s – число избыточных связей;

m – число общих связей, наложенных на механизм в целом;

$\sum p$ – число кинематических пар;

n – число звеньев механизма.

Решетов Л.Н., продолжив изучение влияния избыточных связей на работу шарнирных механизмов, в работе [3] ввел понятие рациональных механизмов, то есть таких, которые избавлены от избыточных связей, и разработал метод исключения избыточных связей – метод контуров, который заключается в составлении структурных таблиц, содержащих сведения о подвижности исследуемого механизма и каждой кинематической пары, входящей в его состав. Для нахождения числа избыточных связей автор рекомендует применять формулу А.П. Малышева, однако в работе Л.Т. Дворникова и одного из авторов статьи [4] доказательно обоснована ошибочность такого предложения. Феномен появления избыточных связей обусловлен невозможностью точного соблюдения идеальной геометрии при соединении звеньев механизма в реальных конструкциях. Это явление особенно характерно для плоских шарнирных механизмов, где уже второе звено не может быть введено в плоскость движения первого без возникновения избыточных связей (рис. 1).

Рассмотрим решение поставленной задачи на примере шарнирного шестизвенного механизма. Основываясь на методике создания механизмов с минимальным числом звеньев и с различным содержанием избыточности связей в структуре [4], проведем структурный синтез данного механизма для поиска всего многообразия структурных схем и выбора кинематических пар с целью компоновки механической системы без избыточных связей.

Суть метода заключается в составлении системы уравнений, где первое уравнение представляет собой сумму кинематических пар, которые будут использованы в механизме, а второе уравнение представляет собой число избыточных связей в механизме.

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 + p_2 + p_1 = \sum p_k, \\ W - 6n + \sum k \cdot p_k = q. \end{cases} \quad (2)$$

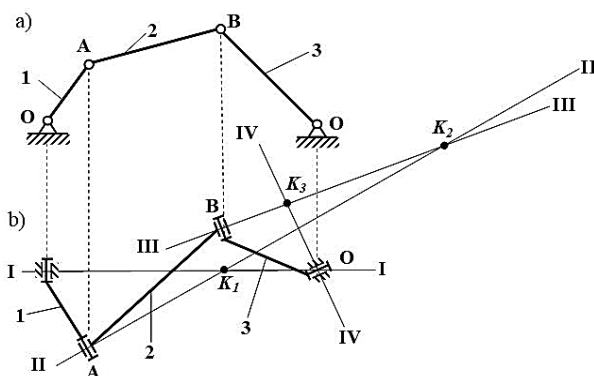


Рис. 1. Избыточность связей в шарнирном четырехзвеннике

Поставленная задача решается с учетом состава используемых кинематических пар p_5 , p_4 и p_3 , так как они являются более простыми для реализации в механизмах.

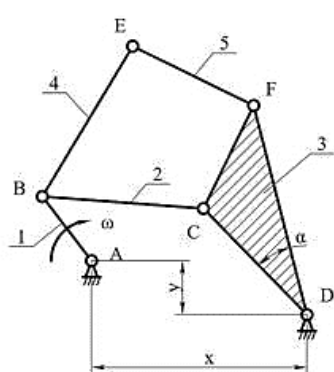
Найденные по формуле (2) сочетания кинематических классов представлены в таблице.

Состав кинематических пар при различном числе избыточных связей

Число избыточных связей q	Исходная система уравнений	Система уравнений для пар p_4 и p_3	Состав кинематических пар
5	$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 = 7, \\ 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 = 34. \end{cases}$	$\begin{cases} p_4 = 13 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 6. \end{cases}$	$p_5 = 6, p_4 = 1, p_3 = 0$
4	$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 = 7, \\ 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 = 33. \end{cases}$	$\begin{cases} p_4 = 12 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 5. \end{cases}$	$p_5 = 6, p_4 = 0, p_3 = 1;$ $p_5 = 5, p_4 = 2, p_3 = 0.$
3	$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 = 7, \\ 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 = 32. \end{cases}$	$\begin{cases} p_4 = 11 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 4. \end{cases}$	$p_5 = 5, p_4 = 1, p_3 = 1;$ $p_5 = 4, p_4 = 3, p_3 = 0.$
2	$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 = 7, \\ 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 = 31. \end{cases}$	$\begin{cases} p_4 = 10 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 3. \end{cases}$	$p_5 = 5, p_4 = 0, p_3 = 2;$ $p_5 = 4, p_4 = 2, p_3 = 1;$ $p_5 = 3, p_4 = 4, p_3 = 0.$
1	$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 = 7, \\ 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 = 30. \end{cases}$	$\begin{cases} p_4 = 9 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 2. \end{cases}$	$p_5 = 4, p_4 = 1, p_3 = 2;$ $p_5 = 3, p_4 = 3, p_3 = 1;$ $p_5 = 2, p_4 = 5, p_3 = 0.$
0	$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 = 7, \\ 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 = 29. \end{cases}$	$\begin{cases} p_4 = 8 - 2p_5, \\ p_3 = p_5 - 1. \end{cases}$	$p_5 = 4, p_4 = 0, p_3 = 3;$ $p_5 = 3, p_4 = 2, p_3 = 2;$ $p_5 = 2, p_4 = 4, p_3 = 1;$ $p_5 = 1, p_4 = 6, p_3 = 0.$

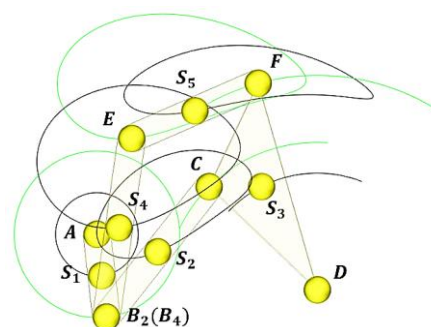
Для дальнейшего исследования выбран вариант при $q = 0$ с числом пар $p_5 = 3$, $p_4 = 2$ и $p_3 = 2$. Расчетная схема и геометрические параметры приведены на рис. 2, а.

Для упрощения моделирования, сборки и изучения движения звенья механизма строятся в виде простых геометрических фигур. Особенностью модели является возможность задания угла наклона φ оси шарнира в точке соединения выходного звена 3 со стойкой, а также возможность перемещения вдоль своей оси двух шарниров: B_2 , принадлежащего звену 2, и B_4 – звену 4.



а

$$\begin{aligned}
 l_{AB} &= 30 \text{ мм}, l_{AB} = 60 \text{ мм}, \\
 l_{AB} &= 55 \text{ мм}, l_{AB} = 65 \text{ мм}, \\
 l_{AB} &= 50 \text{ мм}, l_{AB} = 80 \text{ мм}, \\
 x &= 80 \text{ мм}, y = 20 \text{ мм}, \\
 \alpha &= 30^\circ
 \end{aligned}$$



б

Рис. 2. Расчетная схема механизма

При различных значениях угла наклона выходного звена φ производится симуляция работы механизма. Модель позволяет определять такие характеристики механизма, как траектории перемещения точек механизма (рис. 2, б), скорости, ускорения и значения реакций

в местах соединения звеньев. Для реализации физической модели самоустанавливающегося механизма в работе использовался 3D-принтер Picaso designer, работающий по технологии FDM (Fused Deposition Modeling), основанной на послойном наплавлении термопластичного материала через нагретую экструзионную головку. Данный метод является наиболее доступным и широко применяемым в инженерной практике для быстрого прототипирования и проверки работоспособности конструкций. Основными требованиями при проектировании: легкость сборки; дешевизна конструкции; физическая модель механизма должна представлять собой стенд с возможностью регулирования угла наклона выходного звена. С учетом всех требований и ограничений были спроектированы все звенья физической модели (рис. 3, а).

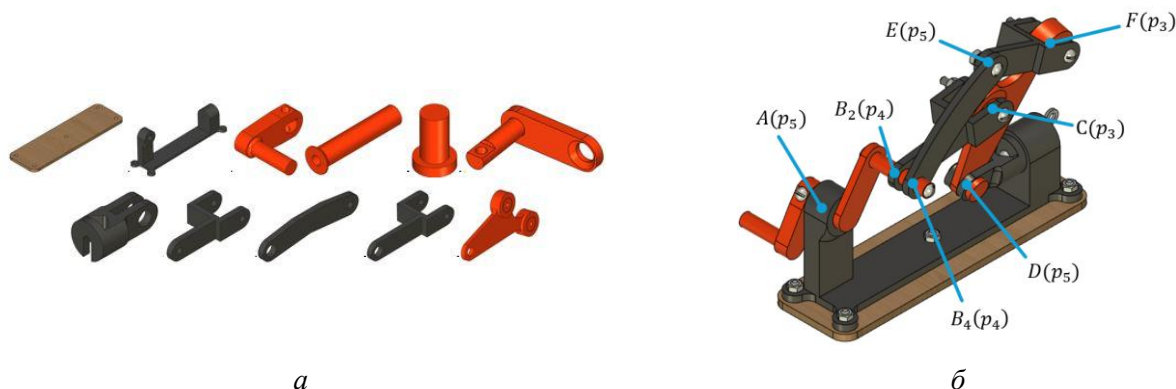


Рис. 3. Твердотельные модели звеньев (а), итоговая сборка физической модели (б)

С использованием библиотеки стандартных изделий (соединение звеньев при помощи винтов и гаек) произведена сборка физической модели в единую подвижную систему для проверки движения и отсутствия возможных наложений звеньев друг на друга (рис. 3, б). Выходное звено выполнено единым целым с парами 3-го класса; для обеспечения их подвижности после печати устанавливается зазор между этими деталями. Данное исполнение обеспечивает прочность соединения и простоту сборки, поскольку шарнир печатается собранным в нужном месте (рис. 4, а). Для печати деталей механизма с использованием программного обеспечения PrushaSlicer 2.9.2 применялся материал PLA ввиду его высокой геометрической стабильности, низкой усадки и простоты печати. Оптимальные параметры печати были определены экспериментально с учетом требований к подвижным соединениям. Основное внимание уделялось обеспечению требуемых зазоров в кинематических парах, физическая модель приведена на рис. 4, б. В ходе проведенного исследования была разработана и апробирована методика проектирования самоустанавливающегося механизма.

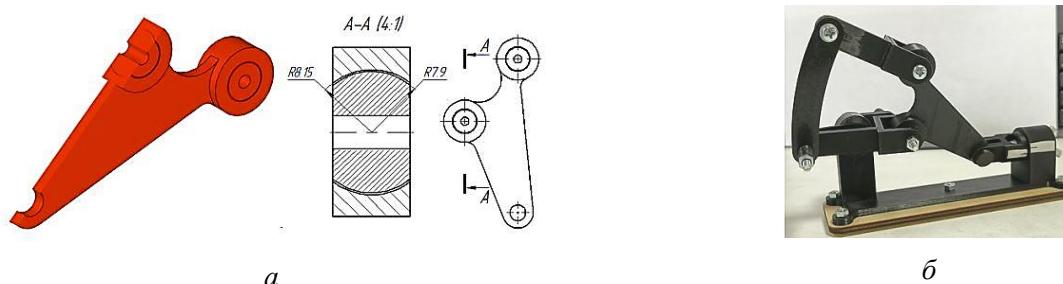


Рис. 4. Исполнение выходного звена (а) физическая модель механизма (б)

Практическая ценность работы заключается в демонстрации комплексного подхода к проектированию: от структурного синтеза до изготовления и испытаний (рис. 5).

Моделирование в CAD/CAE-средах позволило оценить поведение механизма еще до физического изготовления. Использование виртуальной сборки и кинематических симуляций обеспечило возможность корректировки конструкции на ранних этапах, что сократило затраты времени и ресурсов.

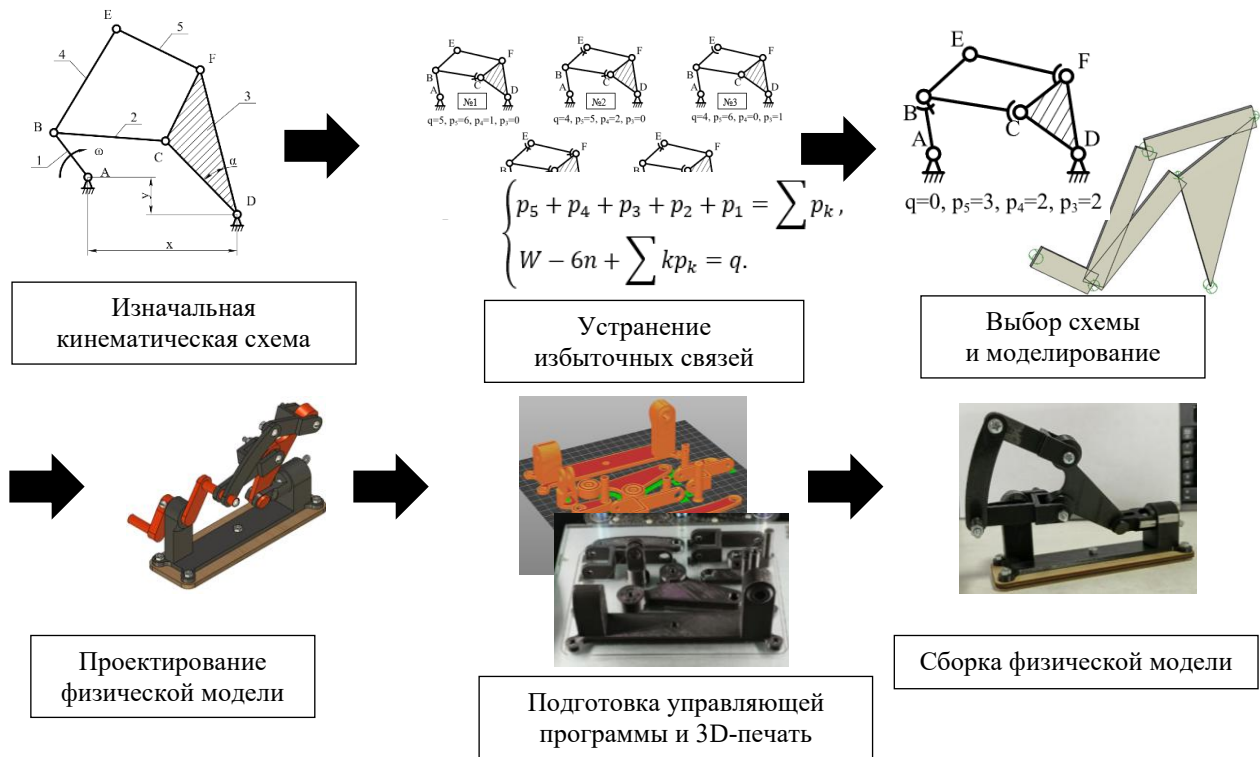


Рис. 5. Алгоритм автоматизированного проектирования механизмов

Применение аддитивных технологий позволило существенно сократить сроки перехода от цифровой модели к физическому образцу. Весь цикл от подготовки файлов в слайсере до получения готового комплекта деталей занял менее суток, что подтверждает высокую эффективность FDM-печати как инструмента быстрой верификации конструктивных решений. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе при подготовке инженеров-механиков, а также в инженерной практике для ускоренного прототипирования новых механизмов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Колчин, Н.И. Опыт построения расширенной структурной классификации механизмов и основанной на ней структурной таблицы механизмов. Анализ и синтез механизмов / Н.И. Колчин // Труды Второго всесоюзного совещания по основным проблемам теории машин и механизмов. – Москва: Машгиз, 1960. – С. 85–97.
2. Добровольский, В.В. Теория механизмов / В.В. Добровольский. – Москва: Государственное научно-техническое изд. Машиностроительной литературы, 1951. – 145 с.
3. Решетов, Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы: справочник / Л.Н. Решетов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1985. – 272 с. – (Библиотека конструктора).
4. Гудимова, Л.Н. Основы теории избыточных связей в механизмах / Л.Н. Гудимова, Л.Т. Дворников – Новокузнецк: ООО Полиграфист, 2019. – 174 с.

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОПИСАНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ФРЕЗЕРНОЙ ГРУППЫ

Долгов А.Б.^{1✉}, начальник серийно-конструкторского бюро,
Никифоров А.А.^{1,2}, главный конструктор гражданского направления, доцент, к.т.н., доцент,
Бочкарев П.Ю.³, профессор, д.т.н., профессор

¹ АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», г. Саратов, Российская Федерация
E-mail: andrdolgov@mail.ru

² Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Российская Федерация
E-mail: ieei_director@mail.ru

³ Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Камышин, Российская Федерация
E-mail: bry@mail.ru

Анализируется проблема недостаточной формализации конструкторской документации, препятствующей автоматизации технологической подготовки производства в многономенклатурном машиностроении. Обоснована необходимость создания цифрового двойника детали на основе теории графов, интегрирующих геометрические и технологические характеристики. В качестве объекта исследуются операции, выполняемые на оборудовании фрезерной группы, с анализом взаимосвязей поверхностей, оборудования и оснастки. Результаты направлены на сокращение трудоемкости технологической подготовки и цифровизацию производства.

Ключевые слова: цифровой двойник детали, технологическая подготовка производства, формализация данных, автоматизация проектирования технологических процессов, многономенклатурное производство, базы знаний

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN MODEL FOR PART SPECIFICATION AND TECHNOLOGICAL CAPACITIES OF MILLING MACHINES

Dolgov A.B.^{1✉}, Head of Serial Design Department,
Nikiforov A.A.^{1,2}, Chief Designer for Civil Applications, Associate Professor,
PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Bochkarev P.Yu.³, Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

¹ JSC “Design Bureau of Industrial Automation”, Saratov, Russian Federation

² Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

³ Kamyshev Technological Institute (branch of Volgograd State Technical University),
Kamyshev, Russian Federation
E-mail: andrdolgov@mail.ru

The article analyzes the problem of insufficient formalization of design documentation, which hinders the automation of manufacturing process planning in multi-product machine building. The necessity of creating a digital twin of a part based on graph theory, integrating geometric and technological characteristics, is substantiated. Operations performed on milling group equipment are studied as the object, with an analysis of the interrelations between surfaces, equipment, and tooling. The results are aimed at reducing the labor intensity of process planning and digitalizing production.

Keywords: digital twin of a part, production process planning, data formalization, graph-based modeling, milling operation, automation of process planning, multivariate production, knowledge bases

Введение

Современное многономенклатурное машиностроительное производство, характеризующееся малосерийностью выпуска, многовариантностью конструктивного исполнения деталей и ужесточением требований к качеству продукции, предъявляет повышенные требо-

вания к эффективности и гибкости технологической подготовки производства (ТПП). Ключевым этапом ТПП является проектирование технологических процессов (ТП) изготовления деталей, качество которого непосредственно зависит от полноты, структурированности и доступности исходной информации об изделии.

Традиционная конструкторская документация (сборочные чертежи, чертежи деталей), являясь формальным заданием для производства, обладает существенными информационными ограничениями. Это увеличивает трудоемкость ТПП, удлиняет сроки отладки технологий, снижает качество и повышает себестоимость производства.

Особую актуальность решение данных проблем приобретает в условиях применения систем автоматизированного проектирования (CAD/CAM), где недостаточная формализация исходных данных становится препятствием для создания интеллектуальных программных комплексов. Отсутствие единых алгоритмизированных методов описания детали как объекта производства не позволяет в полной мере реализовать потенциал автоматизации при переходе от конструкторской модели к технологической.

В этой связи перспективным направлением исследований является разработка методологий глубокой формализации информации об изделии, технологическом оборудовании и оснащении. Такой подход предполагает создание определенных структурированных баз знаний, описывающих не только геометрию детали, но и ее свойства технологичности, функциональные взаимосвязи поверхностей, а также реальные возможности и ограничения производственной системы. Разработка такого методического аппарата позволит перейти от интуитивных методов проектирования ТП к системным, алгоритмизируемым процедурам, основанным на формализованных данных.

Целью работы является анализ проблем информационного обеспечения ТПП, обоснование необходимости подробной формализации процессов проектирования и представление подхода к построению математических моделей описания детали и технологических возможностей оборудования. В качестве практической реализации предложена методология формализации данных для фрезерной операции – одного из наиболее распространенных видов механической обработки, что является шагом к созданию универсальных инструментов сокращения временных затрат на ТПП в условиях многономенклатурного производства.

Материалы и методы

При традиционном проектировании технолог анализирует размерные связи, указанные в чертеже, методом визуального восприятия: выявляет точностные параметры, устанавливает между ними связи, составляет размерные цепи, выполняет пересчет в соответствии с заданными условиями производства и на этой основе разрабатывает технологический процесс.

Анализ традиционной конструкторской документации показывает два ключевых недостатка. Во-первых, в ней отсутствует явно выраженное описание структуры изделия, отражающей состав элементов и их позиционирование относительно друг друга. Во-вторых, документация не содержит информации, характеризующей изделие как производственный объект: на чертежах деталей указываются геометрическое очертание и размеры поверхностей с допусками, однако не определены конструкторские базы (поскольку описывающие размеры дают информацию без векторного указания), нет указания о прочностных характеристиках детали, назначении поверхностей по функциональному признаку, указаний по обработке в сборе с другими поверхностями и назначений в процессе эксплуатации [1–3].

В ходе анализа научно-технической литературы выявлены различные подходы к классификации размеров по функциональному назначению и принципам объединения [1–4], однако общепринятая и универсальная методика нанесения размерных связей до сих пор отсутствует. Из-за того, что данный процесс не регламентирован строгими нормативными предписаниями, разные специалисты выполняют простановку размеров субъективно: геометрия детали воспринимается ими как набор примитивных поверхностей без учета ее целевого назначения в механизме. Отсутствие единообразия в указании предельных отклонений и сокрытие информации о конструкторских базах существенно затрудняет работу технолога

при выборе технологических баз в ходе разработки технологического процесса. В эпоху интенсивного внедрения систем автоматизированного проектирования вопрос унификации размерных обозначений становится особенно значимым.

Отмеченные недостатки затрудняют проведение анализа конструкции изделия, повышают трудоемкость ТПП, снижают ее качество и увеличивают временные затраты на обработку технологических процессов.

Проведенные ранее исследования позволили частично систематизировать способы методического обеспечения технологической подготовки производства (ТПП) при обработке материалов лезвийным инструментом. Тем не менее они не создали основу для формирования универсальных алгоритмов сбора и интерпретации данных, адаптируемых к различным производственным условиям. Ключевая проблема заключается в недостатке исходных данных, которые можно было бы извлечь в формализованном виде из конструкторской и технологической документации без участия узкопрофильного специалиста высокой квалификации [7].

В качестве решения предлагается использовать детализированный подход, включающий строго регламентированные этапы углубленной формализации и алгоритмизации проектных процедур ТПП. При этом учитывается не только их взаимосвязь внутри процесса, но и связь с этапами реализации технологического процесса в конкретных производственных условиях [6, 8]. Чтобы представить последовательность действий технолога в формате, пригодном для последующей программной реализации, требуется провести обширные исследования, направленные на определение структуры баз данных, их содержательного наполнения, обеспечение достоверности и разработку правил своевременного обновления информации.

В предыдущих работах была предложена методика представления конструктивных элементов детали с помощью графовых моделей, что позволило впоследствии построить информационную структуру, аккумулирующую все данные, требуемые для разработки технологических процессов [6–8]. На следующем этапе ставится задача формализованного описания связей между металлообрабатывающим оборудованием и технологической оснасткой. Такой подход дает возможность сопоставлять фактические производственные возможности имеющегося станочного парка с параметрами изготавливаемой детали для аргументированного выбора средств оснащения.

Сложность и многокомпонентность этой задачи, а также значительные объемы обрабатываемых данных требуют установления четких соответствий между характеристиками детали и свойствами оснастки. Для этого предлагается использовать цифровой двойник, который отражает реальные технологические возможности оборудования для механической обработки. Такая цифровая модель включает в себя описание связей между установочными и обрабатываемыми поверхностями, предельные отклонения геометрических форм, требования к качеству обработки, а также учитывает конструктивные особенности детали, параметры рабочего стола станка и элементы оснастки, задействованные при установке, базировании и закреплении заготовки [5, 6].

Для развития методологии наполнения баз знаний в части формализации информационных связей элементов ТП предложено последовательное исследование на примере фрезерной операции и планируется детализация следующих аспектов:

- влияние технологической операции фрезерования на показатели качества поверхности, отфрезерованной в рамках отдельного технологического перехода;
- предельные размеры и качественные показатели поверхностей, используемых в качестве конструкторских и технологических баз;
- требования к взаимному позиционированию базирующих поверхностей для установки приспособлений на фрезерном оборудовании с привязкой к расположению на рабочем столе станка;
- предельные значения рабочих передвижений фрезерного инструмента при обработке;
- взаимосвязь характеристик обрабатываемых и базовых поверхностей детали с элементами технологической оснастки.

Выводы

Практическая реализация методологии формализации данных о технологических возможностях элементов фрезерной операции (технологическая оснастка, инструмент, заготовка, характеристики точности и качества обработки) направлена на создание универсальных инструментов сокращения временных затрат на ТПП в условиях многономенклатурного производства.

Разработанные базы данных и модели описания фрезерных операций пригодны для интеграции в системы автоматизации ТПП. Детальная проработка методологии формализации является необходимым этапом повышения уровня цифровизации технологической подготовки. Создание специализированной базы данных для фрезерной обработки – одного из наиболее распространенных видов механической обработки – создает предпосылки для разработки систем автоматизированного проектирования технологических процессов, адаптированных к реальным производственным условиям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник технолога / Под ред. А.Г. Суслова. – Москва: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
2. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – Москва: Машиностроение, 2000. – 320 с.
3. Базров, Б.М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства: монография / Б.М. Базров. – Москва: КУРС, 2023. – 324 с.
4. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. – Москва: Машиностроение, 2001. – 368 с.
5. Митин, С.Г. Инновационные аспекты автоматизации проектирования операций механической обработки в многономенклатурном производстве / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев // Инновационная деятельность. – 2013. – № 4 (27). – С. 36–41.
6. Бочкарев, П.Ю. Метод отображения технологических возможностей механообрабатывающего оборудования атрибутами теории графов / П.Ю. Бочкарев // Научные технологии в машиностроении. – 2025. – № 1 (163). – С. 38–48. – DOI: 10.30987/2223-4608-2025-1-38-48. – EDN OVBXRP.
7. Решетникова, Е.П. Концепция группирования деталей механообрабатывающих производств при формировании рационального маршрута технологического процесса их изготовления / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – № 3 (117). – С. 19–25.
8. Бочкарев, П.Ю. Повышение качества технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе расширенного анализа конструктивных характеристик деталей / П.Ю. Бочкарев, Е.П. Решетникова // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 12 (150). – С. 30–36. – DOI: 10.30987/2223-4608-2023-30-36.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ОБРАЗУЮЩЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ

Ерисов Я.А.^{1,2✉}, д.т.н., доцент, **Разживин В.А.**¹, ассистент, **Петров И.Н.**¹, ассистент,
Смальцер А.В.¹, магистрант, **Болдырев Д.П.**¹, аспирант

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
г. Самара, Российская Федерация

² Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
г. Самара, Российская Федерация

E-mail: erisov@ssau.ru

Приведены результаты компьютерного моделирования процесса инкрементального формообразования конических деталей из алюминиевого сплава Д16АМ с углами наклона образующей 50°, 55° и 60°. Моделирование выполнялось в программной среде LS-DYNA в два этапа: формообразование и снятие нагрузки. Показано, что увеличение угла наклона приводит к росту деформаций, напряжений и снижению остаточных напряжений. Также проведено сравнение моделируемых и теоретических толщин. Предложен аналитический и графический анализ распределения остаточных напряжений и их зависимости от степени деформации.

Ключевые слова: остаточные напряжения, инкрементальное формообразование, компьютерное моделирование процесса инкрементального формообразования, LS-DYNA

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE TILT ANGLE OF THE FORMING ON THE FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN INCREMENTAL FORMING

Erisov Ya.A.^{1,2✉}, Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Razzhivin V.A.**¹, assistant, **Petrov I.N.**¹, assistant, **Smaltser A.V.**¹, Master's Degree student, **Boldyrev D.P.**¹, PhD student

¹ Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
Samara, Russian Federation

² Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation
E-mail: erisov@ssau.ru

Presents the results of computer simulation of incremental forming of tapered parts made of aluminum alloy D16AM with angles of inclination of 50°, 55° and 60°. Modeling was performed in LS-DYNA software environment in two stages: forming and load removal. It is shown that an increase in the inclination angle leads to an increase in strains, stresses and a decrease in residual stresses. A comparison of modeled and theoretical thicknesses is also made. Analytical and graphical analysis of residual stress distribution and its dependence on the degree of deformation is proposed.

Keywords: residual stresses, incremental forming, computer modeling of incremental forming process, LS-DYNA

Инкрементальное формообразование – это поэтапное локальное пластическое деформирование листовых материалов, обеспечивающее получение сложных тонкостенных деталей без применения специальной оснастки. Основной недостаток процесса – формирование остаточных напряжений, определяемых неравномерностью пластических деформаций и упругой разгрузкой материала, которые оказывают существенное влияние на точность, усталостную прочность и коррозионную стойкость изделий [1–8]. Распределение остаточных напряжений зависит от траектории инструмента, механических свойств материала и геомет-

рических параметров детали, в частности угла наклона образующей [9–11]. Целью настоящей работы является компьютерное моделирование влияния угла наклона образующей на величину остаточных напряжений в программном комплексе LS-DYNA. Схема процесса инкрементального формообразования приведена на рис. 1.

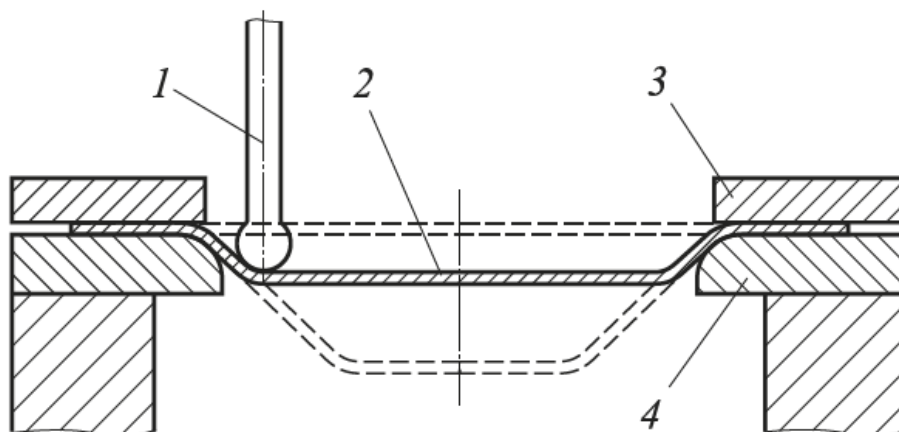


Рис. 1. Принципиальная схема процесса инкрементального формообразования:
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – прижим; 4 – матрица

Моделирование в LS-DYNA включало два этапа: формообразование и разгрузку для определения остаточных напряжений и пружинения. Заготовка представляла собой цилиндрическую пластину диаметром 180 мм и толщиной 1 мм. Инструментальные элементы (пуансон, прижим, матрица) моделировались как абсолютно жесткие тела. Для описания характера течения материала заготовки использовалась модель изотропной пластичности с упрочнением по степенному закону, учитывающая скоростные эффекты.

Контакт «инструмент – заготовка» описывался законом Кулона с коэффициентом трения 0,1. Траектория инструмента разрабатывалась в SprutCAM с шагом по образующей 0,5 мм и экспортировалась в LS-DYNA специализированной программой. Остаточные напряжения рассчитывались с использованием функции INTERFACE_SPRINGBACK и неявного интегрирования (рис. 2).

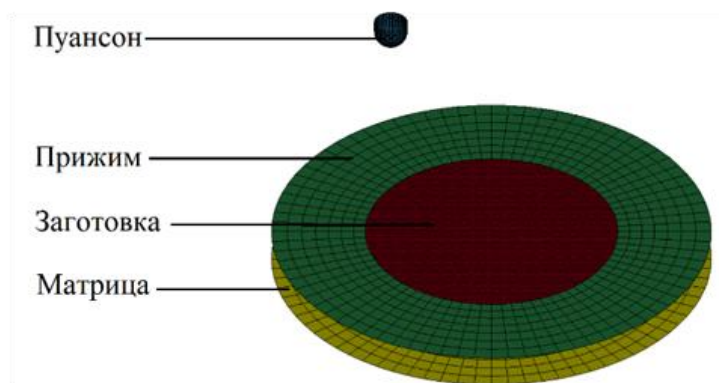


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса инкрементального формообразования

Валидация модели проведена сопоставлением распределения толщины по образующей конических деталей, полученных экспериментально (рис. 3) и при помощи компьютерного моделирования (рис. 4). Выявлено, что толщина уменьшается от фланца к прямолинейному участку, достигая минимума, а затем изменяется незначительно. С увеличением угла наклона образующей утонение стенки усиливается. Толщина составляет: $S_{50} = 0,61$ мм; $S_{55} = 0,55$ мм; $S_{60} = 0,48$ мм при погрешности, не превышающей 5 %.

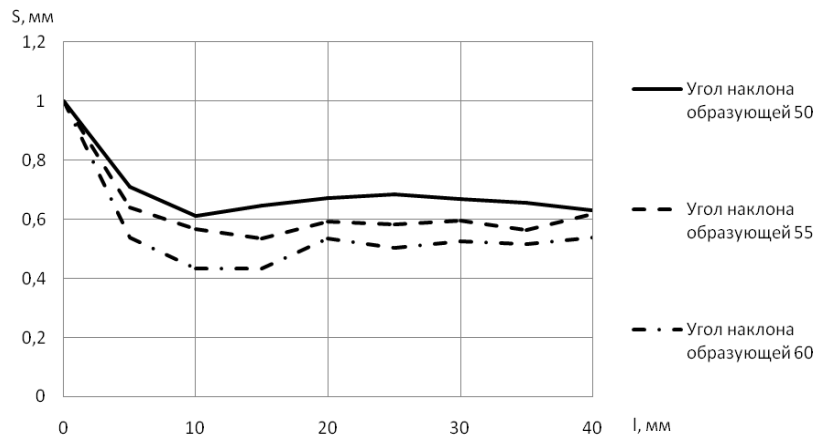


Рис. 3. Распределения толщины по образующей конической детали, полученной на экспериментальном стенде инкрементального формообразования

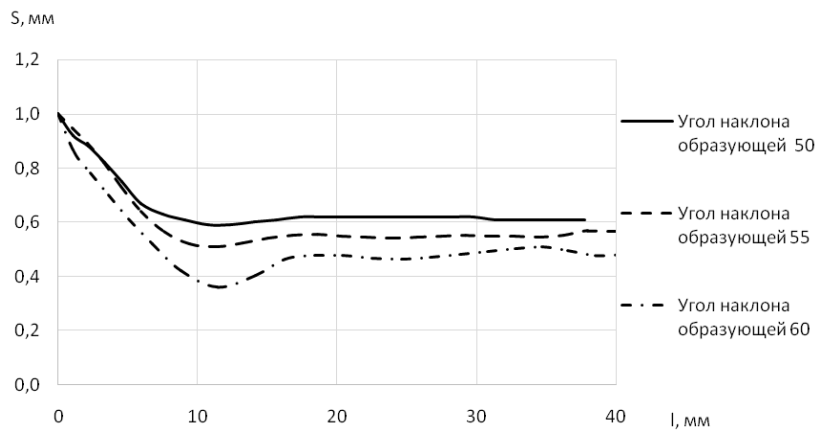


Рис. 4. Распределение толщин по длине образующей конических деталей от фланца

По результатам расчета остаточных напряжений после разгрузки установлено, что тангенциальные остаточные напряжения имеют сжимающий характер (отрицательный знак), а меридиональные – растягивающий (положительный знак). Для тангенциальной компоненты по графикам приведены средние значения порядка -6 МПа (50°), -9 МПа (55°), -12 МПа (60°), при этом по длине образующей наблюдается изменение уровня напряжений от фланца к донной части (рис. 5). Для меридиональной компоненты максимальные значения составляют 196 МПа (50°), 167 МПа (55°), 106 МПа (60°), что указывает на снижение пиков растягивающих остаточных напряжений с ростом угла конусности (рис. 6).

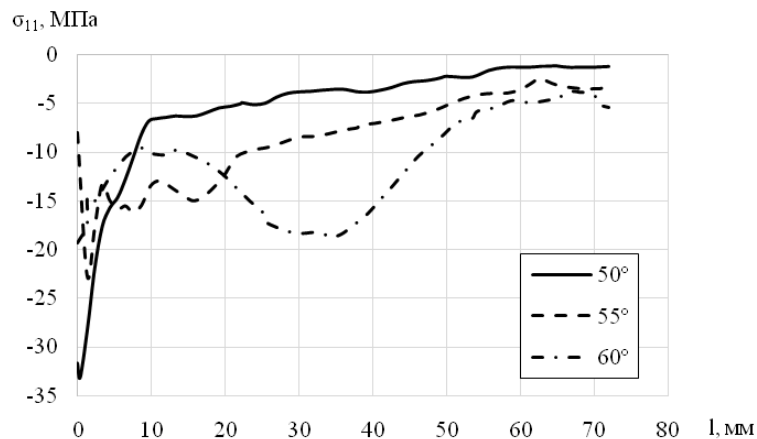


Рис. 5. Тангенциальные остаточные напряжения детали с углами наклона образующей 50°, 55°, 60°

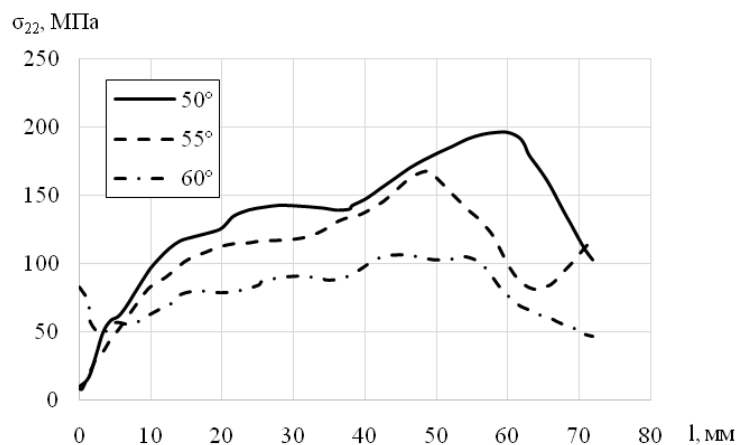


Рис. 6. Меридиональные остаточные напряжения детали с углами наклона образующей 50°, 55°, 60°

Результаты моделирования показали, что с увеличением угла наклона образующей конуса (50°, 55°, 60°) возрастает интенсивность деформаций и напряжений, что согласуется с аналитическими расчетами. Погрешность составляет значение, не превышающее 5 % у деталей с разными углами наклона образующей. Было выявлено, что меридиональные остаточные напряжения имеют растягивающий характер, а тангенциальные – сжимающий. При этом с ростом угла конусности меридиональные и тангенциальные напряжения уменьшаются.

Преобладание растягивающих напряжений вдоль направления движения инструмента и сжимающих – перпендикулярно ему подтверждает значительное влияние угла наклона образующей на распределение остаточных напряжений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Инкрементальная формовка (Single Point Incremental Forming) [Электронный ресурс] // Иркутский национальный исследовательский технический университет. – URL: https://www.istu.edu/deyatelnost/obrazovanie/instituty/»iit/vypolnennye_proekty/inkr_form?special=vkl
2. Investigation on residual stress in rotational parts formed through incremental sheet forming: A novel evaluation method / W Jianxiong, X. Dajiang, L. Xinshun [et al.] // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2022. – Vol. 5. – 7 p. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.08.001>
3. Maqbool, F. Targeted residual stress generation in single and two point incremental sheet forming (ISF) / F. Maqbool, F. Maaß, J. Buhl // Archive of Applied Mechanics. – 2021. – 23 p.
4. Research progress of residual stress measurement methods / Li Xuewen, Liu Jiwei, Wu Hao [et al.] // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – Iss. 7. – e28348. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28348>
5. Колмогоров, Г.Л. Технологические остаточные напряжения после обработки металлов давлением / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 41–45.
6. Махалов, М.С. Остаточные напряжения в упрочняемом упругопластическом теле / М.С. Махалов, В.Ю. Блюменштейн // Обработка металлов. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 110–123.
7. Applications of residual stress in combatting fatigue and fracture / M.N. James, D.G. Hattingh, D. Asquith, M. Newby, P. Doubell // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – Pp. 11–25.
8. Jianxiong, W. Investigation on residual stress in rotational parts formed through incremental sheet forming: A novel evaluation method / W. Jianxiong, X. Dajiang // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2022. – Vol. 5. – No. 1. – Pp. 84–90.
9. An assessment of residual stresses and micro-structure during single point incremental forming of commercially pure titanium used in biomedical applications / K. Rohit, K. Gulshan // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 28, part 2. – Pp. 1261–1266.
10. Mahnouch, A. Residual stress measurement of single point incremental formed Al/Cu bimetal using incremental hole-drilling method / A. Mahnouch // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2019. – Vol. 2. – Pp. 131–139.
11. Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates / S. Sadeghi, M.A. Najafabadi, Y. Javadi, M. Mohammadisefat // Materials and Design. – 2013. – Vol. 52. – Pp. 870–880. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.032>

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Злотников Е.Г., к.т.н., доцент, Афанасьев И.А., студент, Струначев А.С.[✉], студент

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

E-mail: strunachev.s@mail.ru

Рассматривается технология цифровых двойников, применяемая в рамках цифровизации современного машиностроительного производства. Описываются принципы функционирования цифровых двойников, которые позволяют имитировать реальные процессы на всех этапах жизненного цикла продукции. Представлены практические аспекты внедрения цифровых двойников в машиностроительное производство. Затрагиваются такие аспекты, как оптимизация технологических процессов, снижение издержек, сокращение сроков вывода продукции на рынок, повышения качества изделий. Рассматриваются примеры успешного применения технологии, а также сделаны выводы, связанные с преимуществами интеграции цифровых двойников в существующие производственные системы.

Ключевые слова: цифровой двойник объекта, компьютерный инжиниринг, инновационное проектирование, информационные технологии, производительность машиностроительного предприятия, виртуальная среда

ADVANTAGES OF USING DIGITAL DOUBLES IN MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

Zlotnikov E.G., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Afanasyev I.A., student,
Strunachev A.S.[✉], student

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

E-mail: strunachev.s@mail.ru

The article focuses on the application of digital twin technology as a driver for digitalization in modern mechanical engineering production. It describes the principles and operation of digital twins, which allow for the simulation of real processes at all stages of the product lifecycle. The practical aspects of using digital twins in mechanical engineering are explored. This section addresses such aspects as process optimization, cost reduction, time-to-market reduction, and improved product quality. Examples of successful application of technology are considered, and conclusions are drawn regarding the benefits of integrating digital twins into existing production systems.

Keywords: digital twin of an object, computer engineering, innovative design, information technology, productivity of a machine-building enterprise, virtual environment

Сфера машиностроения стремительно развивается во многом благодаря совершенствованию, созданию и внедрению информационных технологий, способствующих поиску новейших решений, направленных на повышение производительности промышленности и качества изделий. Одним из таких решений стало внедрение цифровых двойников на основных этапах производства.

В основе цифровых двойников лежат модели, представляющие реальную систему и отражающие полученные из нее данные. Модели необходимы для упрощения интерпретации этих данных. Таким образом, цифровые двойники – это динамическая виртуальная копия физического объекта. В свою очередь, возможности и свойства цифровых двойников формируются за счет методов моделирования, применяемых по отношению к ним. Это также отражается в деятельности крупных поставщиков программного обеспечения, таких как Microsoft, Amazon или фонд Eclipse, которые активно разрабатывают специализированные языки моделирования для цифровых двойников [1–3].

Важным аспектом цифрового двойника является реализация сквозной динамической двусторонней связи между физическим и виртуальным объектами на протяжении жизненного цикла изделия. Это отличает его от статической 3D-модели. Физический объект через датчики и системы управления непрерывно передает двойнику актуальные данные. Виртуальная модель интерпретирует эту информацию, предоставляя прогнозы, а также рекомендации по оптимизации режимов работы или даже отправляя управляющие команды для превентивного устранения отклонений [2].

Сегодня цифровые двойники считаются важнейшими инструментами, которые повышают эффективность работы, оптимизируют разработку продуктов и сокращают время выхода конечного изделия на рынок. Виртуальная среда широко применяется в машиностроении для проектирования и создания прототипов, профилактического обслуживания и оптимизации производства [1, 3].

Использование цифровых двойников позволяет инженерам отслеживать, анализировать и оптимизировать производительность в режиме реального времени, что в результате повышает эффективность работы и создает условия для разработки и применения инновационных решений в производстве [2].

Регулярное создание физических прототипов требует много времени и средств. Цифровые двойники снижают эту потребность, позволяя инженерам проектировать, тестировать и дорабатывать модели в виртуальной среде. Данный системный подход значительно ускоряет процесс разработки и повышает точность модели. Например, в автомобильной промышленности цифровые двойники позволяют тестировать множество вариантов конструкций, чтобы выбрать наиболее эффективный перед физической реализацией, что приводит к сокращению затрат на брак [1].

Кроме того, интеграция цифровых двойников с такими передовыми технологиями, как, например, машинное обучение, повышает эффективность стратегий профилактического обслуживания. Такое взаимодействие позволяет своевременно устранять неполадки до того, как они перейдут в критическую стадию, и обеспечивать бесперебойную работу машин и оборудования [4].

На этапе производства цифровые двойники играют важнейшую роль в оптимизации производственных процессов. Моделируя различные сценарии работы, инженеры могут совершенствовать производственные процессы и сокращать время простоя, что приводит к повышению производительности. Так, ПАО «КАМАЗ» создала виртуальную копию процесса изготовления поворотного кулака. После анализа технической документации и создания 3D-моделей всех элементов производства время изготовления детали сократилось почти в три раза [5].

Цифровые двойники также значительно упрощают сотрудничество между производителями, участвующими в совместных проектах в области машиностроения. Создавая виртуальные 3D-модели в виде цифровых двойников, доступ к которым могут получить сотрудники, находящиеся в разных географических точках, компании тем самым способствуют совместному подходу к проектированию и разработке. Такая интеграция улучшает коммуникацию и ускоряет процесс принятия решений, обеспечивая эффективное участие всех заинтересованных сторон в проекте [2].

Примером успешного внедрения новой технологии стало применение цифровых двойников при проектировании калибровочных систем для непрерывных раскатных станов на предприятиях Трубной металлургической компании. Благодаря данной программной системе удалось добиться заметного роста точности выпускаемой продукции, освоить изготовление специализированных обсадных труб. Это обеспечило прирост прибыли на сумму выше 65 миллионов рублей, а также позволило существенно модернизировать эксплуатационные режимы работы оправок станов, что позволило добиться комплексного улучшения основных производственных показателей. В данные показатели входят значительное увеличение ресурса инструмента, повышение уровня качества выпускаемой продукции, а также минимизация расходов сырья. Реализованные технологические изменения принесли предприятию экономический эффект в размере порядка 55 миллионов рублей дополнительной прибыли [6].

Существенный прогресс достигнут и в настройке трубопрокатного оборудования. Была внедрена инновационная методология, базирующаяся на использовании бесконтактных измерительных 3D-систем. Такой подход позволил получить положительный экономический эффект около 100 миллионов рублей за счет повышения стабильности производственного процесса изготовления высокоточных труб [6].

К достижениям можно отнести освоение выпуска труб повышенной точности из инновационных марок стали со сниженными издержками. Эта задача также была успешно решена благодаря применению программной системы цифровых двойников. В результате компания получила более 230 миллионов рублей дополнительной прибыли [6].

Исходя из изложенного можно сделать вывод о том, что компании, внедряющие эту технологию, могут рассчитывать на значительные преимущества, в том числе рост производительности и формирование более устойчивой производственной системы. А технология цифровых двойников в машиностроении играет важную роль в оптимизации производительности и общей эффективности работы

Возможность визуализировать виртуальные прототипы и управлять ими помогает выявлять конструктивные недостатки на ранних этапах, что в результате приводит к созданию более инновационных и эффективных решений. Цифровые двойники позволяют производителям принимать обоснованные решения, опираясь на фактические данные; моделируя различные сценарии и прогнозируя результаты, обеспечивают всестороннее понимание физических систем и помогают оптимизировать операции. Такой подход, основанный на данных, улучшает стратегическое планирование и распределение ресурсов, что в итоге приводит к повышению общей эффективности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pfeiffer, Jérôme. Modeling Languages for Automotive Digital Twins: A Survey Among the German Automotive Industry / Jérôme Pfeiffer, Dominik Fuchß, Thomas Kühn // MODELS '24: Proceedings of the ACM/IEEE 27th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems. – 2024. – Pp. 92–103.
2. Digital Twin Platforms: Requirements, Capabilities, and Future Prospects / Daniel Lehner, Jérôme Pfeiffer, Erik-Felix Tinsel, Matthias Milan Strljic, Sabine Sint, Michael Vierhauser, Andreas Wortmann, and Manuel Wimmer // IEEE Software. – 2022. – No. 2. – Pp. 53–61.
3. Enabling technologies and tools for digital twin / Qinglin Qi, Fei Tao, Tianliang Hu, Nabil Anwe, Ang Liu, Yongli Wei, Lihui Wang, A.Y.C. Nee // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – No. 58. – Pp. 3–21.
4. Digital twin [Electronic resource] // Autodesk. – URL: <https://www.autodesk.com/design-make/emerging-tech/digital-twin> (дата обращения: 11.01.2026).
5. Цифровой двойник для дизелистов «КАМАЗа» [Электронный ресурс] // Камаз. – URL: https://kamaz.ru/press/releases/tsifrovoy_dvoynik_dlya_dizelistov_kamaza/ (дата обращения: 12.01.2026).
6. ТМК получила прибыль в размере полумиллиарда рублей от внедрения цифровых двойников [Электронный ресурс] // Группа компаний ТМК. – URL: <https://www.tmk-group.ru/PressReleases/3606> (дата обращения: 15.01.2026).

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОНОБЛОКА НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ НАГРУЗКИ МАШИНЫ ТРЕНИЯ

Карасев Н.И., старший преподаватель

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: karasevn.i@mail.ru

Рассмотрено влияние геометрических параметров измерительного моноблока на метрологические характеристики канала измерения нормальной нагрузки машины трения. Объектом исследования является моноблочная тензометрическая конструкция, используемая в составе информационно-измерительных систем. Методами численного моделирования выполнен анализ напряженно-деформированного состояния при варьировании геометрических размеров упругого элемента. Установлены закономерности изменения чувствительности и линейности преобразования нагрузки, что позволило обосновать рациональные параметры конструкции моноблока.

Ключевые слова: машина трения, измерительный моноблок, метрологические характеристики, нормальная нагрузка, тензометрический преобразователь, численное моделирование

INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE MEASURING MONOBLOCK ON THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF LOAD CHANNELS OF A FRICTION MACHINE

Karasev N.I., senior lecturer

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: karasevn.i@mail.ru

This paper examines the influence of the geometric parameters of a measuring monoblock on the metrological characteristics of a friction machine's normal load measurement channel. The object of the study is a monoblock strain gauge structure used in information and measurement systems. Numerical modeling methods were used to analyze the stress-strain state with varying geometric dimensions of the elastic element. Patterns in the sensitivity and linearity of load conversion were established, which made it possible to substantiate the rational design parameters of the monoblock.

Keywords: friction machine, measuring monoblock, metrological characteristics, normal load, strain gauge transducer, numerical modeling

Машины трения широко применяются для экспериментальной оценки фрикционных и износных характеристик материалов и смазочных сред. Достоверность результатов таких испытаний в значительной степени определяется точностью и стабильностью работы измерительных каналов, прежде всего каналов измерения нормальной нагрузки. Ошибки в определении нагрузки приводят к искажению режимов трения, неверной интерпретации коэффициента трения и некорректной оценке интенсивности изнашивания [1–3].

В современных машинах трения для измерения нагрузок широко используются тензометрические измерительные узлы, выполненные в виде моноблочных упругих элементов. Конструкция такого моноблока одновременно выполняет функции силовоспринимающего элемента и первичного измерительного преобразователя. Геометрические параметры моноблока оказывают существенное влияние на его напряженно-деформированное состояние, чувствительность тензорезисторов и линейность преобразования механической нагрузки в электрический сигнал [4, 5].

Практика эксплуатации машин трения показывает, что при проектировании измерительных моноблоков часто основное внимание уделяется обеспечению прочности конструкции, тогда как влияние геометрических параметров на метрологические характеристики измеритель-

ных каналов учитывается недостаточно. В результате достигается избыточная жесткость упругого элемента, что снижает чувствительность преобразователя, либо, напротив, возникают недопустимые деформации, приводящие к росту погрешности и нестабильности показаний [6].

Особую актуальность данная проблема приобретает для универсальных машин трения, работающих в широком диапазоне нагрузок и режимов испытаний. В таких условиях требуется обеспечить компромисс между жесткостью конструкции, чувствительностью измерительного канала и сохранением упругого режима работы тензометрических элементов.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование влияния геометрических параметров измерительного моноблока на метрологические характеристики канала измерения нормальной нагрузки машины трения. Для достижения поставленной цели в работе выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния моноблока при варьировании его геометрических размеров и рабочих нагрузок, а также дана оценка влияния этих параметров на чувствительность и линейность измерительного канала.

Объект и методика исследования

Объектом исследования является измерительный моноблок, применяемый в составе информационно-измерительной системы машины трения для измерения нормальной нагрузки в зоне контакта испытываемых образцов. Моноблок представляет собой упругий сило-воспринимающий элемент, на поверхности которого размещаются тензометрические резисторы, обеспечивающие преобразование механической деформации в электрический сигнал.

Конструктивная схема исследуемого измерительного моноблока и основные геометрические параметры приведены на рис. 1. Моноблок выполнен на основе Т-образного профиля, вертикальное ребро которого воспринимает нормальную нагрузку, а горизонтальная полка обеспечивает требуемую жесткость конструкции и условия крепления в корпусе машины трения. В зоне сопряжения ребра и основания формируется область максимальных деформаций, в которой целесообразно размещение тензорезисторов.

В качестве материала моноблока рассматривался дюралюминиевый сплав Д16Т, широко применяемый в приборостроении благодаря стабильным упругим характеристикам и высокой удельной прочности. В расчетах материал принимался линейно-упругим и изотропным с модулем упругости $E = 7,1 \cdot 10^4$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,33$.

В качестве основного варьируемого геометрического параметра рассматривалась высота вертикального ребра жесткости Т-образного профиля. Данный параметр оказывает определяющее влияние на распределение напряжений и деформаций в чувствительной зоне моноблока и, как следствие, – на чувствительность и линейность канала измерения нормальной нагрузки. В ходе исследования анализировались варианты конструкции с высотой ребра в диапазоне 25–40 мм, что соответствует реальным условиям компоновки измерительного узла машины трения.

Оценка напряженно-деформированного состояния моноблока выполнялась методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS в модуле Static Structural.

Геометрическая модель разбивалась на тетраэдрические конечные элементы типа Solid186 с локальным сгущением сетки в области предполагаемой установки тензорезисторов. Характерная конечно-элементная сетка исследуемой модели приведена на рис. 2.

Граничные условия моделирования соответствовали реальным условиям работы измерительного узла. Нижняя поверхность основания моноблока моделировалась как жестко закрепленная по всем степеням свободы, что отражает его фиксацию в корпусе машины трения. Нормальная нагрузка прикладывалась к верхней площадке вертикального ребра жесткости и изменялась ступенчато в диапазоне рабочих нагрузок машины трения.

В процессе расчетов для каждого варианта геометрии определялись распределения эквивалентных напряжений по критерию Мизеса и полные деформации в зоне размещения тензорезисторов. Критерием допустимости деформации принималось предельное относительное удлинение тензорезисторов $\varepsilon_{кр} \approx 0,3$ %, превышение которого может приводить к ухудшению линейности преобразования и росту погрешности измерений.

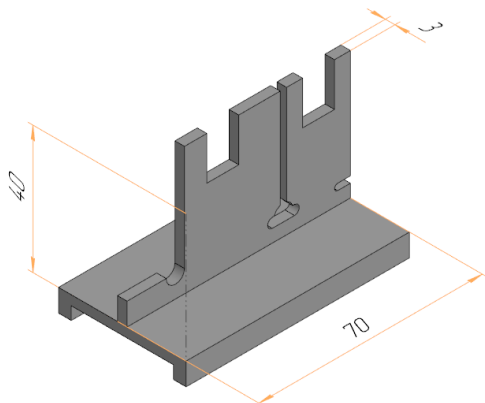


Рис. 1. Расчетная схема измерительного моноблока и основные геометрические параметры

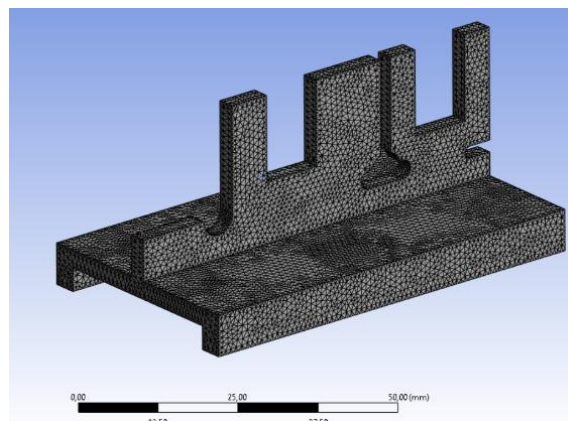


Рис. 2. Конечно-элементная модель измерительного моноблока

Принятая методика позволила выполнить сопоставительный анализ различных вариантов геометрии измерительного моноблока, установить влияние конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние и дать количественную оценку их влияния на метрологические характеристики канала измерения нормальной нагрузки.

Результаты численного моделирования

В результате численного моделирования получены поля эквивалентных напряжений и деформаций измерительного моноблока при различных значениях геометрических параметров и уровней нормальной нагрузки. Анализ показал, что во всех рассмотренных вариантах конструкции напряженно-деформированное состояние носит выражено локальный характер. Максимальные значения эквивалентных напряжений и деформаций формируются в зоне сопряжения вертикального ребра жесткости с горизонтальной полкой моноблока, что соответствует области установки тензорезисторов.

На рис. 3 приведено распределение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса для одного из исследуемых вариантов конструкции при максимальной нормальной нагрузке. Видно, что в зоне чувствительного элемента достигаются наибольшие значения напряжений, тогда как в остальном объеме моноблока напряжения остаются значительно ниже предельных, что свидетельствует о работе конструкции в упругой области.

Распределения полной деформации показывают, что увеличение нагрузки сопровождается монотонным ростом деформаций в чувствительной зоне моноблока. Характерное распределение полной деформации при различных уровнях нагружения приведено на рис. 4.

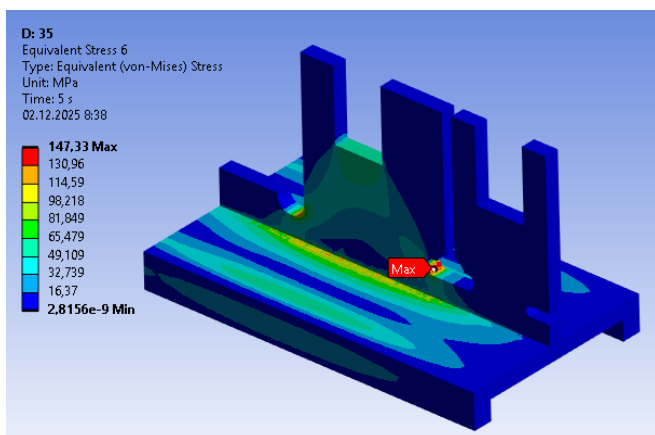


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в измерительном моноблоке при нормальной нагрузке 2000 Н

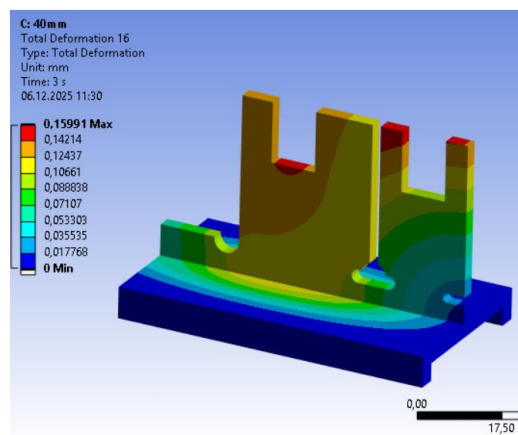


Рис. 4. Распределение полной деформации измерительного моноблока при различных уровнях нормальной нагрузки

Полученные данные подтверждают отсутствие локальных зон пластической деформации и устойчивый упругий характер работы конструкции во всем исследуемом диапазоне нагрузок.

Для количественной оценки влияния геометрических параметров моноблока выполнен анализ зависимостей максимальной деформации чувствительной зоны от приложенной нормальной нагрузки. Во всех рассмотренных вариантах в рабочем диапазоне нагрузок зависимость «нагрузка – деформация» сохраняет характер, близкий к линейному.

Сравнение графических зависимостей показывает, что уменьшение высоты ребра жесткости приводит к увеличению деформации чувствительной зоны при одинаковом уровне нагрузки. Это свидетельствует о росте чувствительности измерительного канала при снижении жесткости упругого элемента. В то же время для отдельных вариантов геометрии при нагрузках, близких к максимальным, деформация приближается к предельно допустимому значению для тензорезисторов.

Сводные результаты расчетов для различных вариантов геометрии измерительного моноблока приведены в таблице. Табличные данные позволяют наглядно сопоставить максимальные значения деформаций при характерных уровнях нагрузки и оценить запас по допустимой деформации чувствительных элементов.

Анализ данных, представленных в таблице и на графиках, показывает, что при уменьшении высоты ребра жесткости достигается увеличение чувствительности канала измерения нормальной нагрузки, однако одновременно сокращается запас по допустимой деформации тензорезисторов. Это определяет необходимость выбора рационального диапазона геометрических параметров, обеспечивающего требуемую чувствительность при сохранении линейности и упругого режима работы моноблока.

Максимальные деформации чувствительной зоны измерительного моноблока при различных значениях высоты ребра жесткости

№ шага	Нагрузка F_n , Н	δ_{max} , мм ($h = 40$ мм)	δ_{max} , мм ($h = 35$ мм)	δ_{max} , мм ($h = 30$ мм)	δ_{max} , мм ($h = 25$ мм)
1	300–500	0,0060	0,0096	0,0092	0,0094
2	700–1000	0,0119	0,0159	0,0153	0,0157
3	1100–1300	0,0298	0,0223	0,0215	0,0220
4	1500–1700	0,0833	0,0319	0,0306	0,0315
5	1900–2000	0,1190	0,0638	0,0614	0,0630

Выводы

1. В результате численного моделирования установлено, что геометрические параметры измерительного моноблока оказывают существенное влияние на метрологические характеристики канала измерения нормальной нагрузки машины трения, определяя чувствительность и линейность преобразования нагрузки.

2. Установлено, что зависимости максимальной деформации чувствительной зоны от приложенной нормальной нагрузки имеют преимущественно линейный характер в рабочем диапазоне нагрузок, что обеспечивает стабильность метрологических характеристик измерительного канала.

3. Сравнительный анализ вариантов геометрии показал, что уменьшение высоты вертикального ребра жесткости приводит к увеличению деформации чувствительной зоны и, соответственно, к росту чувствительности канала измерения нормальной нагрузки.

4. Определено, что чрезмерное снижение жесткости конструкции может приводить к достижению предельных значений относительной деформации тензорезисторов $\epsilon_{кр} \approx 0,3$ % при нагрузках, близких к верхней границе рабочего диапазона, что ограничивает допустимый диапазон геометрических параметров моноблока.

5. С учетом результатов моделирования обоснована необходимость выбора рациональных геометрических параметров измерительного моноблока, обеспечивающих компромисс между повышением чувствительности измерительного канала и сохранением упругого режима работы конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Костецкий, Б.И. Трение, изнашивание и смазка машин / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов. – Киев: Техника, 1970. – 396 с.
3. Буше, М.И. Основы тензометрии / М.И. Буше. – Москва: Энергия, 1974. – 288 с.
4. Белоусов, А.В. Тензорезисторные измерительные преобразователи: учеб. пособие / А.В. Белоусов. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 176 с.
5. Stachowiak, G.W. Engineering Tribology / G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor. – 4th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. – 884 p.
6. ANSYS, Inc. ANSYS Mechanical User's Guide. – Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2020.

РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ ОРГАНАЙЗЕРА

Киселева М.И. , магистрант, **Родионов В.А.**, старший преподаватель

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: mari110603@mail.ru

Представлены результаты исследования и проектирования функционального сувенира, ориентированного на Самарскую область. Создан конкурентоспособный сувенирный продукт – деревянный органайзер с вечным календарем, выполненный в стиле регионального бренда. Определены его практическое назначение и художественно-дизайнерские характеристики. Подобраны материал и технология изготовления с учетом конструктивных особенностей изделия и физико-механических свойств древесины.

Ключевые слова: органайзер, сувенир, 3D-модель, Самарская область, 3D-моделирование, способ изготовления, лазерный станок, фрезерный станок

DEVELOPMENT OF A 3D ORGANIZER MODEL

Kiseleva M.I. , Master's Degree student, **Rodionov V.A.**, senior lecturer

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: mari110603@mail.ru

The article presents the results of the research and design of a functional souvenir aimed at the Samara region. A competitive souvenir product has been created – a wooden organizer with a perpetual calendar, made in the style of a regional brand. Its practical purpose and artistic and design characteristics are determined. The material and manufacturing technology were selected taking into account the design features of the product and the physical and mechanical properties of wood.

Keywords: organizer, souvenir, 3D model, Samara region, 3D modeling, manufacturing method, laser machine, milling machine

На сегодняшний день рынок сувенирной продукции Самарской области характеризуется острой нехваткой изделий, сочетающих региональную идентичность, практическую пользу и высокий уровень исполнения. Большинство предлагаемых сувениров – это массовые изделия низкого качества (магниты, брелоки и т. п.), которые не обладают долгосрочной ценностью и быстро утрачивают актуальность. В связи с этим возникает потребность в разработке функционального сувенира премиум-сегмента, способного играть роль не только памятного подарка, но и полезного предмета интерьера, ежедневно напоминающего о регионе [1].

Целью данного исследования стало создание, проектирование и изготовление функционального сувенира – деревянного органайзера с вечным календарем, отражающего образ Самарской области. Для достижения цели были последовательно решены следующие задачи: проведен анализ существующего рынка, сформулирована концепция изделия, объединяющая утилитарные функции органайзера и календаря с региональной символикой; разработана детальная цифровая модель; выбраны оптимальные технологии ее физической реализации – комбинированное применение фрезерной и лазерной обработки на станках с ЧПУ; изготовлен и собран опытный образец, подвергшийся оценке по ключевым параметрам.

Центральной идеей проекта стало внедрение механизма «вечного» календаря, реализованного через систему переставляемых деревянных кубиков. Такой подход обеспечивает изделию интеллектуальную составляющую и многолетний срок службы, выделяя его на фоне одноразовых бумажных аналогов. В качестве основного материала был выбран дубовый мебельный щит благодаря его экологичности, прочности, эстетической выразительности и от-

личной пригодности для обработки на оборудовании с числовым программным управлением. Нанесение официального герба Самарской области и надписи «Самара» обеспечивает изделию четкую региональную принадлежность и делает его достойным подарком (рис. 1).



Рис. 1. 3D-модель-концепция органайзера

Проектирование осуществлялось в среде параметрического моделирования КОМПАС-3D [2], что позволило создать комплексную трехмерную модель, включающую как геометрию деталей, так и векторные контуры для последующей гравировки. Использование данного ПО обеспечило высокую точность расчетов и упростило генерацию управляющих программ для станков. Визуализация 3D-модели выполнена в программе SolidWorks.

Технологический процесс был разделен на два этапа. На первом этапе фрезерный станок с ЧПУ использовался для объемной обработки: вырезания контуров, формирования пазов и гнезд под кубики, что обеспечило надежную сборку и точное сопряжение всех элементов конструкции. Древесина, обработанная таким образом, сохраняет свою естественную текстуру и не подвержена деформации [3–5]. На втором этапе лазерный станок с ЧПУ применялся для декоративной отделки – нанесения герба и надписи методом гравировки. Этот способ позволил добиться высокой четкости изображения и контрастности за счет контролируемого термического воздействия на поверхность дерева без использования красителей.

Изготовленный опытный образец подтвердил эффективность принятых проектных и технологических решений. Изделие демонстрирует высокий функциональный потенциал для использования на рабочем столе, а его сувенирная ценность усиливается качеством исполнения и узнаваемой региональной символикой [6]. Применение натурального дерева и продуманная эргономика обеспечивают изделию долговечность, а пользователю – приятные тактильные ощущения.

В результате работы был создан уникальный сувенирный продукт (рис. 2, 3), успешно закрывающий существующий рыночный дефицит.



Рис. 2. Фотографии готового изделия

Практическая значимость проекта заключается в демонстрации эффективного подхода к разработке малосерийной качественной продукции путем интеграции современных цифровых CAD/CAM-технологий и традиционных природных материалов [7].



Рис. 3. Фотография элементов готового изделия

Разработанная модель и апробированная технологическая цепочка могут быть адаптированы к созданию аналогичных изделий, представляющих другие регионы России, тем самым способствуя формированию культуры осмысленного и функционального сувенира.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Киселева, М.И. Разработка 3D-модели универсального календаря / М.И. Киселева // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2025. – С. 133–136.
2. КОМПАС-3D [Электронный ресурс]. – URL: <https://kompas.ru/>
3. Родионов, В.А. Моделирование рельефной матрицы для получения оттиска на тонколистовом материале в программе SolidWorks / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2018. – С. 112–115.
4. Родионов, В.А. Моделирование обработки матрицы для получения рельефного оттиска на тонколистовом материале / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Молодежная наука: вызовы и перспективы: матер. II Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Сызрань, 2019. – С. 128–130.
5. Андреева, Е.А. Художественная работа по дереву / Е.А. Андреева. – Москва: Рипол Классик, 2007. – 384 с.
6. Абрамова, О.К. Разработка 3D-модели изделия «органайзер для украшений» / О.К. Абрамова, В.А. Родионов // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2023. – С. 3–5.
7. Услин, Д.А. Разработка 3D-модели и изготовления предмета интерьера / Д.А. Услин // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2025. – С. 158–160.

ВИРТУАЛЬНАЯ И ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Кладовщиков С.В.[✉], студент, Пузанкова А.Б., доцент, к.п.н.

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: semenkladovnikov@gmail.com

Описано применение виртуальной и дополненной реальности на стадиях проектирования, сборки, обслуживания и обучения персонала на производстве. Представлены преимущества использования виртуализации в машиностроении, а также приведены реальные примеры применения технологии на крупных предприятиях.

Ключевые слова: виртуальная и дополненная реальность, виртуализация, проектирование

VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY IN MECHANICAL ENGINEERING

Kladovshchikov S.V.[✉], student, Puzankova A.B., Associate Professor, PhD in Pedagogical Sciences

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: semenkladovnikov@gmail.com

The application of virtual and augmented reality at the stages of design, assembly, maintenance, and personnel training in manufacturing is described. The advantages of using virtualization in mechanical engineering are presented, along with real-world examples of technology implementation at major enterprises.

Keywords: virtual and augmented reality, virtualization, engineering design

В наше время очень часто встают вопросы оптимизации, удешевления и ускорения производства. Одним из способов решения этих проблем является использование виртуальной и дополненной реальности. В данной работе собраны и представлены сведения о виртуализации машиностроения на этапах проектирования, сборки, обслуживания продукта и обучения персонала, а также реальные примеры применения данной технологии.

Например, на этапе проектирования современные VR-очки поддерживают основные программы для моделирования (SolidWorks, Autodesk Inventor, КОМПАС-3D) (рис. 1), что дает возможность инженерам буквально войти внутрь детали. Это позволяет проанализировать внутреннюю конструкцию агрегата и исправить возможные ошибки до создания дорогостоящего аппарата. Благодаря этому конструкторы могут оценить эргономику и удобство обслуживания будущего продукта для его совершенствования [1–3].

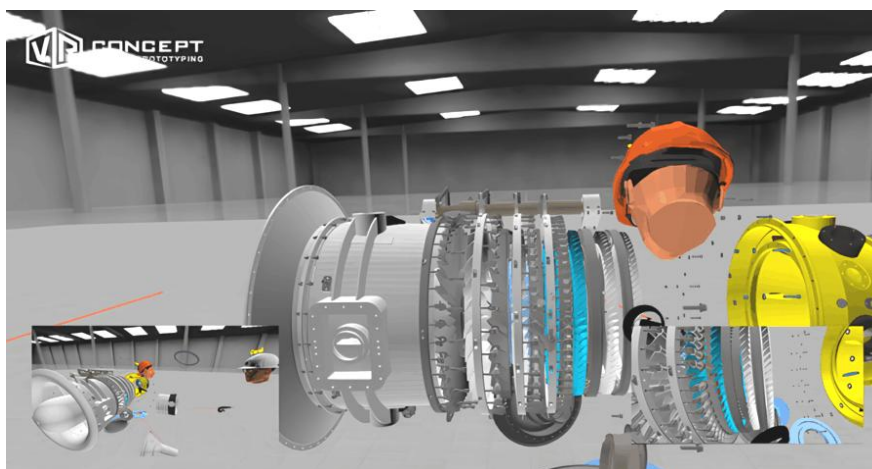


Рис. 1. Проектирование в программе КОМПАС-3D с использованием виртуальной реальности

При проектировании изделий с использованием VR-технологий в машиностроении появилась возможность сборки по интерактивной карте. Вместо бумажных чертежей сборщик видит 3D-проекцию следующей детали на месте ее установки с указанием момента затяжки болтов, что исключает случайный фактор ошибки при компоновке [4].

VR-очки, например, Lenovo ThinkReality VRX, позволяют видеть данные датчиков поверх реального оборудования. Инженер видит сквозь металл потоки жидкости, температуры, зоны вибрации на функционирующем оборудовании. При наведении на деталь система показывает износ и выводит остающийся ресурс ее работы (рис. 2).



Рис. 2. Обслуживание агрегата при помощи виртуальной реальности

При обучении персонала [3] в виртуальной среде можно имитировать возгорания, утечки газа или поломки, позволяя персоналу отработать действия по их нейтрализации без риска для жизни. Чтобы обучить новичка, не нужно останавливать агрегат для обучения (рис. 3).



Рис. 3. Обучение технике безопасности при аварийных случаях в VR-режиме

Рассмотрим пример (рис. 4) реального применения: Kia Motors Corporation в 2019 году представили систему VR для анализа конструкторско-дизайнерских решений, основной задачей которых было повышение качества и эффективности процесса разработки новых моделей автомобилей [5].

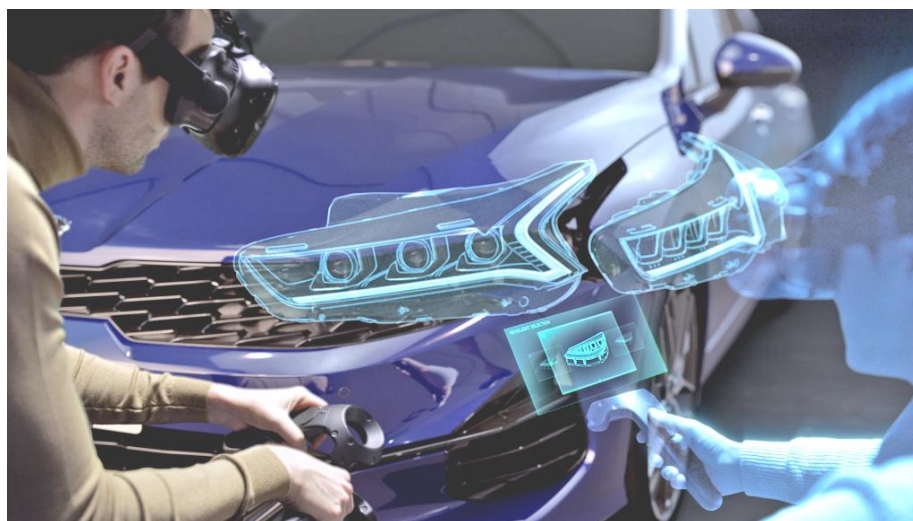


Рис. 4. Применение виртуальных технологий на производстве Kia Motors

Вместо дорогих физических макетов дизайнеры работают в иммерсивной среде, что позволяет быстро вносить правки и значительно экономить ресурсы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванова, А.В. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения [Электронный ресурс] / А.В. Иванова // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2018. – № 3 (108). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-virtualnoy-i-dopolnennoy-realnosti-vozmozhnosti-i-prepyatstviya-primeneniya> (дата обращения: 07.02.2026).
2. Апенькин, А.В. Применение VR/AR-технологий в машиностроении [Электронный ресурс] / А.В. Апенькин // МИТРО 2024 «Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника»: материалы докл. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов. – Гомель: Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, 2024. – С. 22–23. – URL: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/40066/22-23.pdf> (дата обращения: 07.02.2026).
3. VR- и AR-технологии в машиностроении позволяют оптимизировать проектирование, улучшать процессы обучения и подготовки персонала, а также сокращать затраты и время на производство [Электронный ресурс] // Versusgames. – URL: <https://versusgames.com/ru/resheniya/mashinostroenie> (дата обращения: 07.02.2026).
4. Внедрение технологий дополненной реальности в промышленные предприятия [Электронный ресурс] // Отходы и ресурсы: Научный интернет-журнал. – 2020. – URL: <https://resources.today/PDF/08INOR220.pdf> (дата обращения: 07.02.2026).
5. Опыт использования VR и AR в крупнейших компаниях (например, Hyundai, Kia, Boeing, Siemens) [Электронный ресурс] // Vizzion. – 2025. – URL: <https://vizzion.ru/publications/articles/opit-ispolzovaniya-vr-i-ar-v-krupnejshih-kompanijah/> (дата обращения: 07.02.2026).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕРЕВЯННОГО КРЕСЛА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Козиков А.А. , магистрант, **Родионов В.А.**, старший преподаватель

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: k.kozicov2013@gmail.com

Представлено проектирование кресла сложной формы, выполненного из массива ясеня. Рассмотрены особенности его конструкции и визуального образа, обоснован выбор материала и технологии производства.

Ключевые слова: кресло, сложная форма, интерьерная мебель, предмет интерьера, 3D-модель, 3D-моделирование

DESIGNING A WOODEN CHAIR WITH A COMPLEX SHAPE USING 3D MODELING

Kozikov A.A. , Master's Degree student, **Rodionov V.A.**, senior lecturer

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: k.kozicov2013@gmail.com

This paper presents the design of a complex-shaped chair made of solid ashes. The design and visual features are discussed, along with the rationale for the choice of material and manufacturing technology.

Keywords: armchair, complex shape, interior furniture, interior item, 3D model, 3D modeling

Современный интерьер все чаще опирается не только на функциональность, но и на индивидуальность предметов, которые формируют пространство. Одним из таких элементов выступает кресло, способное стать смысловым центром помещения благодаря сочетанию выразимой формы и практичности [1, 2]. При разработке представленного изделия внимание уделялось не столько декоративности, сколько цельности образа и логике его конструкции. Здесь основная нагрузка ложится на плавную форму, объединяющую спинку и сиденье в один непрерывный элемент.

Стилистически кресло ориентировано на современные направления, в которых преобладают лаконичные линии и мягкие радиусы. Такой подход часто встречается в североевропейском дизайне, где предметы строятся вокруг идеи визуальной легкости и естественной фактуры. Плавные изгибы и отсутствие резких переходов подчеркивают монолитность формы, а минимальное количество визуальных разрывов способствует восприятию изделия как цельного объемного объекта. Благодаря этому кресло органично вписывается в интерьеры, где ценится спокойная геометрия и натуральные материалы.

В качестве основного материала выбран ясень. Его светлая золотистая фактура хорошо согласуется с мягкими изгибами конструкции и позволяет подчеркнуть объем без дополнительного декоративного акцента. Ясень устойчив к деформации, обладает высокой прочностью и подходит для деталей сложной геометрии, что делает его востребованным в производстве дизайнерской мебели.

Наиболее выразительной деталью изделия является криволинейная форма спинки, плавно переходящая в сиденье. Для ее изготовления применяется технология трехмерного формования мебельной фанеры. Многослойная заготовка прогревается и прессуется в объ-

емную оснастку, благодаря чему удастся получить устойчивую геометрию без внутренних напряжений [5, 6, 7]. Наружная поверхность облицовывается натуральным шпоном ясеня, что позволяет сочетать стабильность многослойной конструкции с естественной текстурой массива. Такой подход обеспечивает необходимую прочность при сохранении визуальной целостности изделия.

Перед тем как перейти к визуальной и конструкторской проработке, форма кресла была воспроизведена в CAD-среде. Для моделирования использовалась программа SolidWorks, поскольку она дает возможность работать с поверхностями, необходимыми для плавных переходов формы [3]. В процессе построения применялись операции «Поверхность по сечениям», «Поверхность по направляющей» и «Поверхность по траектории», что позволило добиться непрерывных линий и точного согласования кривизны между элементами [4]. Геометрия основного блока моделировалась как единая оболочка, после чего была уточнена с использованием инструментов сглаживания и локальной правки поверхности. Такое решение позволяет использовать модель как основу для последующей технологической подготовки.

Фотореалистичное изображение изделия выполнено в Blender (рис. 1).



Рис. 1. Визуализация 3D-модели кресла, вид 3/4 спереди



Рис. 2. 3D-модель кресла, вид 3/4 сверху

Несмотря на то, что программа относится к среде художественного моделирования, ее рендер-движок Cycles обеспечивает корректную работу со светом и материалами и позволяет получить изображение, близкое к реальному виду изделия. Для визуализации были созданы текстуры, соответствующие фактуре ясеня, и выбрано мягкое студийное освещение, позволяющее подчеркнуть геометрию и глубину материала. Рендер служит не только для демонстрации внешнего вида, но и для предварительной оценки пропорций, что особенно полезно на стадии проектирования (рис. 2).

Для оценки визуального облика изделия была выполнена интерьерная визуализация в программной среде *Blender*. Сцена моделировалась с учетом естественного освещения и типичных условий эксплуатации мебели в жилом пространстве.

Такой подход позволил проанализировать взаимодействие формы кресла с окружающей средой, оценить характер светотеневых переходов на поверхностях из ясеня и убедиться в гармоничности изделия в составе интерьерной композиции.

Полученные изображения (рис. 3) подтвердили корректность выбранных пропорций и выразительность силуэта кресла в реальных условиях.



Рис. 3. Визуализация 3D-модели кресла в интерьере

Представленное кресло является результатом комплексного подхода, объединяющего работу с формой, материалом и цифровыми инструментами. Использование современных методов моделирования и визуализации позволило сформировать точное представление об изделии еще до этапа физического изготовления. Примененные решения делают конструкцию технологичной, а ее внешний вид – выразительным, что обеспечивает дальнейшую возможность введения изделия в производство и адаптации к различным интерьерным сценариям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Киселева, М.И. Разработка 3D-модели универсального календаря / М.И. Киселева // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2025. – С. 133–136.
2. Услин, Д.А. Разработка 3D-модели и изготовление предмета интерьера / Д.А. Услин // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2025. – С. 158–160.
3. SolidWorks 2025 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.solidworks.com/>
4. Родионов, В.А. Моделирование рельефной матрицы для получения оттиска на тонколистовом материале в программе SolidWorks / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2018. – С. 112–115.
5. Родионов, В.А. Моделирование обработки матрицы для получения рельефного оттиска на тонколистовом материале / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Молодежная наука: вызовы и перспективы: матер. II Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Сызрань, 2019. – С. 128–130.
6. Андреева, Е.А. Художественная работа по дереву / Е.А. Андреева. – Москва: Рипол Классик, 2007. – 384 с.
7. Абрамова, О.К. Разработка 3D-модели изделия «органайзер для украшений» / О.К. Абрамова, В.А. Родионов // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2023. – С. 3–5.

ИСТОРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И НОВЫЕ ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Кордюков А.В., доцент, к.т.н., доцент

*Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева,
г. Рыбинск, Российская Федерация
E-mail: kordukovant@mail.ru*

Представлен исторический анализ развития САПР ТП и выполнена оценка их применимость в условиях современного мелкосерийного производства. В качестве решения предлагается принципиально новая архитектура САПР ТП, основанная на интеграции многоагентных систем, цифровых двойников и больших языковых моделей для создания адаптивных, самообучающихся и человеко-ориентированных систем технологического планирования.

Ключевые слова: компьютерное проектирование технологических процессов (CAPP), много-агентные системы, цифровые двойники, большие языковые модели (LLM), искусственный интеллект (ИИ), адаптивные системы, интеллектуальное проектирование

HISTORICAL ANALYSIS AND NEW APPROACHES TO AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS DESIGN FOR SMALL-BATCH PRODUCTION

Kordyukov A.V., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*P.A. Solovyev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation
E-mail: kordukovant@mail.ru*

A historical analysis of the development of Computer-Aided Process Planning (CAPP) systems is presented, along with an assessment of their applicability in modern small-batch production. As a solution, a fundamentally new CAPP architecture is proposed, based on the integration of multi-agent systems, digital twins, and large language models to create adaptive, self-learning, and human-centric technological planning systems.

Keywords: computer-aided process planning (CAPP), multi-agent systems (MAS), digital twins, large language models (LLMs), artificial intelligence (AI), adaptive systems, intelligent design

Попытки построения систем автоматизации технологической подготовки производства начинаются с 1960-х годов. Обусловлены они были появлением ЭВМ. Характерной чертой первых разработок стали алгоритмы для решения локальных расчетных задач. В этот период одним из наиболее заметных советских ученых, работающих в данной области, был Горанский Г.К. Он разработал типовые подпрограммы для алгоритмизации технологических расчетов и заложил основы автоматизации расчета норм времени и режимов резания. Одновременно с решением локальных задач начали формироваться первые теоретические обобщения, послужившие в дальнейшем основой для будущих систем автоматизации. В 1970–1980-е годы развитие САПР ТП охарактеризовалось переходом к системно-структурному подходу и развитием формализации проектных задач.

Работы Цветкова В.Д. [1] посвящены полному циклу автоматизации – начиная с формализации описания детали до разработки методик синтеза переходов с использованием моделей рассуждения и отонологий. Митрофанов С.П. предложил методы формирования представления информации из чертежей для последующей обработки, классификацию деталей и формализацию проектирования технологического процесса через теорию множеств и графов, что позволило перейти к автоматизированному проектированию на основе типовых решений.

В период 1990–2010-х годов произошла смена парадигмы САПР ТП, направленная в сторону их интеллектуализации. Обусловлено это внедрением производственных моделей, экспертных систем и элементов искусственного интеллекта. В работах Палюха Б.В. и Бурдо Г.Б. [2, 3] предложены механизмы синтеза решений, системы критериев оценки и методы представления знаний, направленные на адаптацию к динамичным условиям производства. Одновременно с развитием концепции CALS происходила интеграция САПР ТП с CAD/CAM-системами, началось использование параметрических моделей объектов производства и цифровых двойников.

Разработка и применение методологического и математического обеспечения САПР ТП в настоящее время еще более связаны с интеллектуализацией решаемых задач. Выражается это в применении различных методов искусственного интеллекта. Например, для решения оптимизационных задач, связанных с выбором режимов резания, минимизацией себестоимости и времени обработки, а также прогнозированием качества поверхности используют нейросетевые модели, генетические алгоритмы и аппарат нечеткой логики [4–6].

Для формализации и структурирования технологической информации используют онтологическое моделирование и управление знаниями. Разрабатываются онтологии предметной области, семантические сети и базы знаний, что позволяет создавать интеллектуальные системы, способные к логическому выводу и повторному использованию проектных решений. Например, в работах [7, 8], такой подход обеспечивает смысловую согласованность данных, поддерживает интеграцию с CAD/PLM-системами и облегчает адаптацию САПР ТП к специфике конкретных предприятий.

Активно начинают применять цифровые двойники для создания виртуальных копий технологических процессов и производственных систем с целью их предварительной верификации и оптимизации. Интеграция цифровых двойников с CAD/CAM/CAE-средами дает возможность моделировать выполнение технологического процесса и при этом анализировать влияние изменений параметров оборудования, оснастки и инструмента до физической реализации. В работах [9–11] подчеркивается, что это снижает риски, сокращает время наладки оборудования и повышает обоснованность технологических решений, особенно в условиях мелкосерийного производства.

Применяются подходы к распознаванию геометрии деталей, основанные на признаковом описании деталей и параметрическом моделировании. Они позволяюткратно увеличивать степень автоматизации САПР ТП. Автоматическое распознавание конструктивно-технологических элементов из 3D-моделей, параметризация чертежей и использование перестраиваемых моделей операционных заготовок позволяют динамически генерировать и корректировать технологические процессы. В работах [12–14] показана тесная связь между конструкторской и технологической подготовкой, сокращающая рутинные операции и поддерживающая быструю адаптацию к изменениям номенклатуры.

Объективной тенденцией является глубокая интеграция САПР ТП в сквозные цифровые среды предприятия на основе PLM-стратегий и единых информационных пространств. Такая интеграция подразумевает объединение данных CAD, CAM, CAE, PDM и ERP-систем, что обеспечивает согласованность изменений в изделии. В работах [15–17] подобная интеграция показана для мелкосерийных производств, за счет чего можно эффективно координировать проектные, технологические и производственные процессы в условиях высокой вариативности и сжатых сроков.

Условия, в которых протекает производственный процесс в мелкосерийных производствах, характеризуются малыми партиями и, как следствие, – широкой номенклатурой. Все это делает традиционные САПР ТП, используемые на рынке, экономически неэффективными, так как они ориентированы в целом на стабильные процессы изготовления, характерные для средне- и многосерийных производств, когда время внесения изменений и смены объекта производства измеряется месяцами. Особенно данная проблема проявляется при внедрении в производство сложных изделий.

Практически все технологические САПР не учитывают текущее состояние производственной среды и не имеют алгоритмов адаптации к нему. В условиях мелкосерийных производств важными факторами для проектирования технологического процесса являются реальная загрузка оборудования, его состояние, доступность и наличие инструмента и оснастки. Данные сведения технологу приходится учитывать в режиме ручного обновления, что часто может привести к простоям и сбоям в производственном графике.

Проблемой также является и отсутствие обратной связи о состоянии производства у конструктора, что приводит к решениям, значительно усложняющим или удорожающим последующее изготовление детали. Как отмечается в работе [18], отсутствие эффективных механизмов обратной связи между проектными и производственными подсистемами увеличивает трудоемкость и себестоимость в условиях многономенклатурного выпуска.

В условиях мелкосерийных производств зачастую для ускорения процесса проектирования применяют типовые и аналогичные технологические процессы и их элементы. Это хорошо для похожих и аналогичных деталей, но для сложных и уникальных деталей нехарактерно, а заданные алгоритмы и базы правил проектирования техпроцессов не справляются с генерацией новых нестандартных решений. Все это также увеличивает долю ручного труда и затягивает процесс разработки.

Для преодоления указанных ограничений необходимы принципиально новые подходы к построению САПР ТП. Такие системы должны быть способны к самообучению, динамической адаптации и автономному принятию решений в условиях неопределенности и постоянных изменений производственной ситуации. Решение лежит в переходе от централизованных статичных архитектур к распределенным, интеллектуальным и гибким платформам.

Таковыми платформами служат многоагентные системы (МАС). Они представляют собой парадигму распределенного искусственного интеллекта, в которой автономные программные агенты взаимодействуют для достижения общих целей. При выполнении технологического проектирования каждый агент должен специализироваться на решении конкретной задачи: распознавании геометрических признаков детали, выборе оборудования, расчетов режимов резания, формировании маршрутной и операционной технологии и других. Способность агентов к переговорам, кооперации, конкуренции и самостоятельному принятию решений в реальном времени позволяет преодолеть статичность традиционных систем САПР ТП. Как показано в работах [19, 20], МАС способны динамически адаптировать технологический процесс к изменяющейся номенклатуре, доступности ресурсов и текущему состоянию цеха.

Преимуществом агентного подхода также является его естественное соответствие децентрализованной и сетевой природе современного цифрового производства, основанного на парадигме индустрии 4.0. Агенты могут быть связаны с цифровыми двойниками станков, инструментов и заготовок, образуя киберфизическую систему, где виртуальное проектирование непрерывно синхронизируется с физическим исполнением. Это создает замкнутый контур, в котором агенты-планировщики могут оперативно перестраивать и адаптировать маршруты обработки в ответ на сбой оборудования, изменение производственной ситуации или смену приоритетов заказов.

Однако для реализации своего полного потенциала многоагентные системы нуждаются в эффективных механизмах коммуникации, координации и способности работать с неструктурированной информацией и нечетко сформулированными требованиями технолога. Именно здесь возникает необходимость в интеграции МАС с большими языковыми моделями (LLM). Современные LLM способны выступать в роли интеллектуального интерфейса между человеком и сложной агентной системой, интерпретируя естественно-языковые запросы пользователя и преобразуя их в формальные команды или ограничения для агентов.

Совместная работа МАС и LLM позволит создать принципиально новый класс человеко-ориентированных САПР ТП. Инженер-технолог может формулировать задачи в свободной форме (например, «спроектируй операцию чистового фрезерования кармана с учетом имеющихся фрез, оборудования и с ограничением по времени обработки»), а LLM, выступая в роли семантического процессора, декомпозирует запрос, извлекает ключевые сущности

и параметры, иницируя взаимодействие соответствующих специализированных агентов. При этом формальное ядро системы, представленное агентами, гарантирует технологическую корректность, соблюдение стандартов и физическую реализуемость проектных решений, убирая риски «галлюцинаций», присущие чисто LLM-подходам.

Такой гибридный подход (LLM + MAC) открывает путь к созданию самообучающихся и объяснимых систем. LLM могут анализировать исторические данные, документацию и отчеты, пополняя онтологическую базу знаний, которой оперируют агенты. В свою очередь, агенты, накапливая опыт успешных и неудачных решений в конкретной производственной среде, могут предоставлять структурированные данные для дообучения LLM, создавая цикл непрерывного улучшения.

Таким образом, развитие современной САПР ТП для цифровых мелкосерийных производств лежит на пути объединения трех ключевых технологий: многоагентных систем (как основы для распределенного принятия решений), цифровых двойников (как источника достоверной виртуальной среды) и больших языковых моделей (как когнитивного интерфейса для человеко-машинного взаимодействия). Это позволит создать адаптивные, устойчивые и интуитивно понятные САПР ТП, которые смогут не только автоматически генерировать технологические процессы, но и динамически их оптимизировать в зависимости от производственной ситуации, объяснять свои решения и встраиваться в систему умного завода.

В заключение можно отметить, что проведенный исторический анализ и оценка современных трендов развития показывают, как развитие САПР ТП движется от инструментов автоматизации рутинных расчетов к созданию комплексных, интеллектуальных и адаптивных систем поддержки принятия решений. Наиболее перспективным направлением для мелкосерийных производств является разработка архитектур, объединяющих методологическую строгость (онтологии, формальные модели), вычислительную мощь методов ИИ (нейросети, оптимизационные алгоритмы) и принципы распределенного взаимодействия (многоагентные системы). Все это позволит устранить указанные недостатки САПР ТП при использовании их в мелкосерийных производствах.

Дальнейшие исследования будут нацелены на разработку методологии и инструментов для интеграции многоагентных систем, проектирование специальных агентов, объединение цифровых двойников и больших языковых моделей в единый контур технологического проектирования. Наиболее важными задачами являются: создание стандартизированных онтологий и протоколов взаимодействия агентов, разработка методов совместного обучения LLM и агентов на данных производствах, а также обеспечение безопасности и объяснимости принимаемых автоматическими системами решений.

Внедрение САПР ТП нового поколения, построенных на принципах агентно-ориентированной архитектуры и гибридного интеллекта, станет основным фактором цифровой трансформации машиностроения, позволит перейти от реактивного к проактивному и адаптивному технологическому планированию, где система не только автоматически формирует процессы, но и непрерывно их оптимизирует, прогнозирует результаты и обучается на собственном опыте.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Цветков, В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В.Д. Цветков. – Минск: Наука и техника, 1979. – 264 с.
2. Палюх, Б.В. Механизм синтеза решений при проектировании ТП в комплексных САПРТП / Б.В. Палюх, Г.Б. Бурдо // Вестник ТГТУ. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 500–506.
3. Палюх, Б.В. Представление знаний в системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами / Б.В. Палюх, Г.Б. Бурдо // Вестник ТГТУ. – 2010. – Т. 16, № 2.
4. Селиванов, С.Г. Нейроструктурный и логикогенетический методы оптимизации проектных технологических процессов / С.Г. Селиванов, В.В. Никитин, М.В. Селиванова // Вестник УГАТУ. Машиностроение. – 2013. – Т. 17, № 1 (54). – С. 98–107.

5. Fostering Creativity in Engineering Design Through Constructive Dialogues with Generative Artificial Intelligence / Requejo W. Solórzano [et al.] // *Cell Reports Physical Science*. – Elsevier, 2024. – Vol. 5. – Pp. 102157.
6. Kant, G. Predictive Modelling and Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness Using Artificial Neural Network Coupled with Genetic Algorithm / G. Kant, K.S. Sangwan // *Procedia CIRP*. – 2015. – Vol. 31. – Pp. 453–458.
7. Куликов, Д.Д. Управление знаниями в автоматизированной системе ТПП / Д.Д. Куликов // *Известия вузов. Приборостроение*. – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 41–45.
8. A Review and Classification of Manufacturing Ontologies / P. Sapel [et al.] // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – Springer, 2024.
9. Пономарев, К.С. Цифровой двойник производства – средство цифровизации деятельности организации / К.С. Пономарев, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. – 2019. – № 2 (4). – С. 11–17.
10. Шведенко, В.Н. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем / В.Н. Шведенко, А.Е. Мозохин // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2020. – Т. 20, № 6. – С. 815–827.
11. Critical analysis of the impact of artificial intelligence integration with cutting-edge technologies for production systems / V. Varriale [et al.] // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – Springer, 2025. – Vol. 36. – No. 1. – Pp. 61–93.
12. Технологическая подготовка производства деталей на станках с ЧПУ с использованием перестраиваемых 3D-моделей операционных заготовок / К.В. Абрамян [и др.] // *Металлообработка*. – 2020. – № 4 (118). – С. 50–59.
13. Методика формирования параметрических моделей деталей для автоматизированного проектирования технологических процессов / Д.Д. Куликов [и др.] // *Известия вузов. Приборостроение*. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 155–161.
14. Sivakumar, S. A feature-based system for CAD/CAM integration through STEP file for cylindrical parts / S. Sivakumar, V. Dhanalakshmi // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. National Institute of Science Communication and Information Resources (NISCAIR). – 2013. – Vol. 20. – Pp. 21–26.
15. Булавин, В.Ф. PLM-стратегия в мелкосерийном производстве машиностроительной отрасли / В.Ф. Булавин, В.В. Яхричев, В.А. Глазков // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2018. – № 8 (701). – С. 37–49.
16. Цифровая трансформация технологического сопровождения производства в малых предприятиях / В.Ф. Булавин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2021. – № 9 (738). – С. 15–29.
17. Zhu, C.-F. A framework for feature based CAD/CAM integration / C.-F. Zhu, N.N. Gindy, Y. Yue // *Balanced Automation Systems*. – Dordrecht: Springer, 1995. – Pp. 429–436.
18. Митин, С.Г. Разработка механизмов взаимодействия между конструкторской и технологической подготовкой производства для принятия рациональных проектных решений / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев // *Вестник СГТУ*. – 2014. – № 2 (75). – С. 131–136.
19. Multi-agent reinforcement learning for online layout planning and scheduling in flexible assembly systems / L. Kaven [et al.] // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – Springer, 2024. – Vol. 35. – No. 12. – Pp. 3917–3936.
20. Automation platform independent multi-agent system for robust networks of production resources in industry 4.0 / M. Seitz [et al.] // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – Springer, 2021. – Vol. 32. – No. 8. – Pp. 2023–2041.

АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Косульников А.С. , аспирант, **Кордюков А.В.**, доцент, к.т.н., доцент

*Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева,
г. Рыбинск, Российская Федерация
E-mail: kosulnikov_as@rsatu.ru*

Анализируется применение агентно-ориентированного подхода для автоматизированного проектирования технологических операций. Рассматриваются его достоинства, включая гибкость, адаптивность и способность к самоорганизации, а также недостатки – сложность координации и высокие вычислительные затраты. Предлагается структура гибридной много-агентной сети для решения данной задачи, сочетающая элементы децентрализованного взаимодействия и управляющей координации.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование технологических процессов (САПР ТП), проектирование технологических операций, многоагентные системы, агентно-ориентированный подход, адаптивные технологические процессы

AN AGENT-ORIENTED APPROACH FOR AUTOMATED DESIGN OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS

Kosulnikov A.S. , PhD student,

Kordyukov A.V., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*P.A. Solovyev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation
E-mail: kosulnikov_as@rsatu.ru*

The application of an agent-oriented approach for the automated design of technological operations is analyzed. Its advantages, including flexibility, adaptability, and self-organization capability, as well as its disadvantages – coordination complexity and high computational costs – are considered. A structure of a hybrid multi-agent network for solving this problem is proposed, combining elements of decentralized interaction and managing coordination.

Keywords: Computer-Aided Process Planning (CAPP), design of technological operations, multi-agent systems, agent-oriented approach, adaptive technological processes

Автоматизированное проектирование технологических операций является одним из основных этапов технологической подготовки производства и относится к многокритериальным и вычислительно-сложным задачам. Несмотря на длительную историю развития систем автоматизированного проектирования технологических процессов, в настоящий момент они представляют собой системы, которые нацелены на автоматизацию процесса заполнения технологической документации.

При этом классические методы проектирования операций, таких как создание единичных технологических процессов или использование групповых технологических процессов, демонстрируют недостаточную гибкость и адаптивность в применении к решению задач проектирования индивидуальных технологических процессов.

В поисках решений, которые помогут преодолеть ограничения классических методов проектирования операций, ученые основываются на принципах унификации и типизации, заложенных в работах Соколовского А.П., Митрофанова С.П. [1], при этом все чаще начинают применяться методы искусственного интеллекта, в частности агентно-ориентирован-

ный подход. Данный метод предлагает модель организации вычислительного процесса, основанную на взаимодействии автономных интеллектуальных программных агентов. Использование этого метода при проектировании операций позволяет формировать технологический маршрут, учитывая актуальное состояние и загруженность оборудования, наличие инструмента и т. д.

Так, в статье [2] рассматривается вопрос формирования архитектуры многоагентной системы для сетевых предприятий, где с помощью UML-диаграмм описываются алгоритмы взаимодействия между агентами, а также применение онтологий для обеспечения согласованности между агентами. Предложенная архитектура также может быть адаптирована к проектированию технологических операций, когда агент технологической модели детали может выступать в роли «заказчика» и, основываясь на исходных и конечных данных, формировать запрос на проектирование технологической операции. При этом прочие агенты, отвечающие за оборудование, основываясь на данных о текущем состоянии и загрузке, предлагают вариант технологической операции. Подобным образом реализованная многоагентная сеть для планирования и управления изменениями на предприятии радиоэлектроники описана в статье [3].

Авторы предлагают использовать ряд агентов, каждый из которых выполняет определенную роль, например управления процессом и планирования внедрения изменений или прогнозирования сроков и эффективности внедрения. Однако стоит отметить, что данная система потребует вмешательства человека при возникновении внештатных ситуаций или попытке внедрения сложнопрогнозируемых решений.

Альтернативным вариантом применения многоагентных сетей является создание систем принятия решений, которые позволяют в большинстве случаев избежать недостатков, перечисленных ранее. Так, в статье [4] авторы предлагают архитектуру, состоящую из двух основных типов агентов: агенты первого типа решают сложные, трудноформализуемые задачи, при этом эти агенты действуют автономно, обладают собственной структурой, а также способны взаимодействовать между собой при помощи сообщений и обращения к распределенной базе знаний; агенты второго типа предназначен для обеспечения непрерывного функционирования агентов первого типа, они выполняют распределение ресурсов, поддерживают связь между агентами, а также реализуют взаимодействие с операционной системой.

Применение данной архитектуры для проектирования технологических операций позволит формировать технологический процесс как результат самоорганизующегося взаимодействия агентов. Экспертные агенты, представляющие операции (токарную, фрезерную, контроль), автономно анализируют задание и вступают в переговоры, выдвигая условия и согласовывая последовательность действий через общую базу знаний. Системные агенты в это время обеспечивают вычислительные ресурсы, отказоустойчивость и эффективное взаимодействие между участниками. В итоге система создает не жесткий предопределенный маршрут, а адаптивный технологический процесс, способный динамически подстраиваться под изменения условий и ресурсов в реальном времени.

Однако несмотря на описанные преимущества применения агентно-ориентированного подхода для проектирования технологических операций, необходимо учитывать ограничения и потенциальные риски при его практической реализации. В статье [5] приводится описание основных типов агентов в многоагентных сетях, где отмечаются характерные для них недостатки. Так, реактивные агенты, основанные на простейшей схеме «стимул – реакция», отличаются жесткостью поведения, отсутствием адаптивности и неспособностью к работе в условиях неопределенности или неполноты данных. Интеллектуальные агенты, обладающие внутренней моделью среды и механизмами рассуждения, требуют значительных вычислительных ресурсов, сложны в разработке и могут принимать ошибочные решения при несовершенстве своих моделей или в условиях информационного дефицита. Специализированные агенты, такие как роботы-покупатели или персональные ассистенты, часто оказываются сильно зависимыми от конкретных форматов данных или интерфейсов, что ограничивает их гибкость и переносимость. Дополнительную сложность при практической реализации

создают задачи координации действий разнородных агентов, разрешения конфликтов и обеспечения безопасного взаимодействия в рамках единой системы. Эти факторы требуют тщательного учета на этапе проектирования для минимизации рисков внедрения агентно-ориентированных решений в реальные технологические процессы.

Аналогично в статье [6] рассматриваются две основные архитектуры в многоагентных сетях: централизованная (иерархическая) и децентрализованная (распределенная). В централизованной архитектуре существует единый управляющий центр, который отвечает за декомпозицию глобальной задачи, распределение подзадач между агентами и синтез результатов. Достоинством такого подхода является высокая управляемость, предсказуемость и упрощенная координация действий, что облегчает проектирование и отладку системы. Однако централизация увеличивает риск отказа системы при отказе координатора, что снижает масштабируемость системы, а также может приводить к перегрузке центра при увеличении числа агентов или сложности задач. В противоположность этому децентрализованная архитектура основывается на прямом взаимодействии агентов без единого управляющего центра.

Такой подход обеспечивает высокую устойчивость к отказам, лучшую масштабируемость и способность к самоорганизации, что позволяет системе адаптироваться к динамическим изменениям среды. Однако распределенная координация действий может приводить к конфликтам целей, сложностям в синхронизации или конфликтным эффектам, что усложняет проектирование, контроль и анализ поведения системы в целом. Выбор архитектуры зависит от конкретных требований задачи: централизованный подход лучше применять в условиях четко структурированных задач с жесткими требованиями к управлению, тогда как децентрализованный – при проектировании систем с высокой динамикой, неполной информацией и требованием к отказоустойчивости.

Пример реализации многоагентных систем для проектирования технологических маршрутов представлен в работе [7]. Многоагентная система IMPlanner-MAS функционирует на основе координации автономных программных агентов, на взаимодействии которых реализуется проектирование технологических процессов. Работа системы строится на разделении двух типов агентов: агентов-задач, представляющих производственные задания и координирующих их выполнение, и агентов-услуг, предоставляющих специализированные вычислительные функции, такие как распознавание признаков, выбор технологических операций, построение сетей процессов или имитационное моделирование.

Принцип взаимодействия между ними реализован через механизм рыночно-ориентированных коалиций: агент-задача, получив задание, запрашивает услугу на виртуальном «рынке», которым управляет агент-дилер. Дилер, используя механизмы переговоров, формирует временную коалицию из необходимых агентов-услуг для выполнения запроса. Все коммуникации между агентами стандартизированы и осуществляются через обмен сообщениями с использованием явной онтологии, что обеспечивает семантическую точность и взаимопонимание при передаче сложных производственных данных. Вычислительная нагрузка распределяется по сети, так как агенты-услуги выполняют свои алгоритмы локально, а мобильность агентов позволяет минимизировать сетевой трафик. Таким образом, система функционирует как децентрализованное самоорганизующееся сообщество, где каждый агент автономен, но при этом способен кооперироваться для достижения общей цели.

Таким образом, агентно-ориентированный подход является перспективной основой для развития системы автоматизированного проектирования технологических операций, позволяя преодолеть ограничения классических методов в части гибкости и адаптивности. Основным достоинством данного метода выступает способность формировать технологический маршрут как результат самоорганизующегося взаимодействия автономных агентов, что обеспечивает учет актуального состояния производственных ресурсов в реальном времени. Это позволяет проектировать нежесткие, динамически адаптирующиеся процессы, что важно в условиях мелкосерийного производства. Однако практическая реализация подхода сопряжена со значительными сложностями, такими как необходимость разработки сложных механизмов координации и разрешения конфликтов между агентами, высокие вычислительные затраты на организацию

взаимодействия, а также риск принятия неоптимальных решений в условиях неполноты данных или несовершенства внутренних моделей интеллектуальных агентов.

Применение этого метода для задач проектирования технологических операций видится наиболее эффективным на этапах формирования и планирования вариантов, где требуется комплексная оценка и согласование множества альтернатив. На этих этапах агенты функционируют в тесном взаимодействии с формализованной технологической моделью детали, выступающей в роли единого цифрового двойника изделия, и обращаются к распределенным базам знаний, содержащим структурированную информацию о технологических возможностях, ресурсах и производственных ограничениях. Для совмещения достоинств децентрализованных систем и управляемости централизованных подходов может быть предложена гибридная архитектура многоагентной сети.

Применение гибридного подхода позволит сохранить способность системы к динамическому изменению при проектировании операций, одновременно гарантируя необходимый уровень предсказуемости и согласованности принимаемых решений для достижения производственных целей в реальном времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Митин, С.Г. Совершенствование принципов автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов механизаций и производств / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев // Научные технологии в машиностроении. – 2024. – № 1 (151). – С. 16–22.
2. Казаков, В.А. Многоагентная система сетевого предприятия на основе цифровой платформы индустрии четвертого поколения / В.А. Казаков, Ю.Ф. Тельнов // Открытое образование. – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 34–45.
3. Ирзаев, Г.Х. Многоагентная система автоматического планирования и управления инженерными изменениями на предприятии радиоэлектроники / Г.Х. Ирзаев, А.А. Адамова, Н.К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2025. – № 3. – С. 45–53.
4. Зайцев, Е.И. Агентно-ориентированная интеллектуальная система поддержки принятия решений: архитектура и разработка / Е.И. Зайцев, Е.В. Нурматова // Вестник российского нового университета. Серия Сложные системы. Модели. Анализ. Управление. – Москва: Российский новый университет, 2025. – № 3. – С. 85–96.
5. Худайназаров, С.С. Агенты в искусственном интеллекте / С.С. Худайназаров, А.Т. Шермухамедов, Б.М. Холбоев // 3-я Всероссийская молодежная научная конференция. – Ташкент, Узбекистан: Ташкентский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, 2022. – Т. 2. – С. 531–535.
6. Лукичева, Н.М. Проблемы использования многоагентных систем / Н.М. Лукичева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление. Вычислительная Техника. Информатика. Медицинское приборостроение. – Юго-Западный государственный университет, 2012. – № 1. – С. 86.
7. Sormaz, D.N. IMPlanner-MAS: A Multiagent System for Distributed Manufacturing Process Planning / D.N. Sormaz, A. Sarkar, S. Ghosal // Procedia Manuf. – Elsevier, 2018. – Vol. 26. – Pp. 1242–1254.

МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ «DENFORD» НА ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРЫ EDGE-FOG-CLOUD

Котов А.К., магистрант, **Лагута В.С.**, к.т.н., доцент, **Овсянников М.В.**, к.т.н., доцент

*Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана,
 г. Москва, Российская Федерация
 E-mail: kotovak@student.bmstu.ru, laguta@bmstu.ru*

Представлены результаты разработки многоуровневой системы управления гибкой производственной системой «Denford» на основе иерархичной архитектуры (edge-fog-cloud). Архитектура ориентирована на цифровую трансформацию производственных систем и концепцию Индустрии 4.0. Выполнены сравнения с облачной системой на базе SAP HANA и интеллектуальной системой на основе семантической базы знаний. Приведены экспериментальные данные о времени отклика на различных уровнях взаимодействия. Показан вариант применения разработанной архитектуры для управления безлюдным производством изделий ракетно-космической техники.

Ключевые слова: гибкая производственная система, edge-fog-cloud computing, облачное управление, безлюдное производство, цифровая трансформация

MULTI-LEVEL CONTROL SYSTEM FOR THE FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM “DENFORD” BASED ON EDGE-FOG-CLOUD ARCHITECTURE

Kotov A.K., Master's Degree student, **Laguta V.S.**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Ovsyannikov M.V.**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
 E-mail: kotovak@student.bmstu.ru, laguta@bmstu.ru*

The paper presents the results of developing a multi-level control system for the “Denford” flexible manufacturing system based on a hierarchical edge-fog-cloud architecture. The proposed architecture is oriented toward the digital transformation of manufacturing systems and the Industry 4.0 concept. Comparisons are made with a cloud-based system built on SAP HANA and an intelligent system utilizing a semantic knowledge base. Experimental data on response times at various interaction levels are provided. An application example of the developed architecture for unmanned manufacturing of aerospace components is demonstrated.

Keywords: flexible manufacturing system, edge-fog-cloud computing, cloud-based control, unmanned production, digital transformation

Гибкая производственная система (ГПС) «Denford» на кафедре РК9 МГТУ им. Н.Э. Баумана используется для образовательных целей, а также является экспериментальной площадкой для апробации современных архитектур систем управления компьютерно-интегрированными производствами [1]. Система включает токарный станок Denford Meteor, фрезерный станок Denford Triac VMC, робототехнический комплекс с пятью степенями свободы, транспортно-складскую систему с автоматизированным складом на 48 позиций и систему контроля качества.

Облачная система управления разработана на каф. «Компьютерные системы управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2020 г. на базе программного обеспечения SAP HANA Cloud Platform с использованием Raspberry Pi в качестве локальных контроллеров [2]. Связь с облаком организована через WebSocket, управление станками – через интерфейс RS-232 и Ethernet. Система обеспечивает дистанционное управление, мониторинг в реальном времени, а также возможность интеграции с системами ERP/MES/CAD. Однако централизованная архитектура имеет определенные ограничения по времени отклика в процессе управления оборудованием ГПС.

Интеллектуальная система управления создана на этой же кафедре в 2021 г. на основе семантической базы знаний для промышленного интернета вещей [3]. Ядром являются модули инженерных знаний, формирующие технологические маршруты с учетом загрузки оборудования и наличия ресурсов. Многоагентная архитектура обеспечила децентрализованное управление и отказоустойчивость.

Для преодоления ограничений предшествующих работ разработана трехуровневая система управления на основе концепции edge-fog-cloud computing (рис. 1). Архитектурное решение распределяет функции управления между тремя уровнями в зависимости от требований к быстродействию [4].



Рис. 1. Иерархия функций управления безлюдного производства

На edge-уровне реализуются функции управления в реальном времени: позиционирование исполнительных механизмов, траекторное движение, обработка сигналов датчиков и формирование команд на аварийные отключения. Этот уровень реализуется на локальных контроллерах, обеспечивающих минимальные задержки.

На fog-уровне осуществляется координация между модулями системы: агрегирование данных, маршрутизация заготовок, управление транспортной системой и контроль заданий. Туманный уровень обеспечивает баланс между скоростью обработки и доступностью вычислительных ресурсов. На cloud-уровне выполняются задачи, требующие больших вычислительных ресурсов: анализ данных с применением машинного обучения, предиктивная диагностика оборудования, долговременное хранение информации и интеграция с корпоративными системами.

На ГПС «Denford» были проведены экспериментальные измерения времени отклика в процессе управления оборудованием на каждом уровне. На edge-уровне время отклика составило 0,02–0,04 с, что обеспечивает управление в реальном времени. На fog-уровне – 0,1–0,2 с, что приемлемо для координации работы модулей. На cloud-уровне – 0,3–0,7 с, этого интервала времени достаточно для аналитики и машинного обучения. Результаты подтверждают эффективность распределения функций между уровнями и позволяют достичь оптимального баланса между быстродействием и качеством управляющих решений (рис. 2).

Разработанная архитектура была предложена в рамках учебного проекта для управления безлюдным производством ракетно-космической техники – изготовления шар-баллонов методом электронно-лучевой наплавки (ЭЛН) [5].

Технологический цикл изготовления одной полусферы шар-баллона составляет ~4 часа, что требует непрерывного функционирования без оператора и, соответственно, ставит задачу иерархического распределения функций управления в рамках производственного цеха. Для решения этой задачи ГПС «Denford» использована как объект-аналог производственного участка ЭЛН. Эксперименты показали эффективность многоуровневой архитектуры: edge-уровень обеспечил управление установкой ЭЛН в реальном времени, fog-уровень – коорди-

нацию производственного цикла, cloud-уровень – мониторинг и предиктивную диагностику. Организация эффективного обмена данными между уровнями минимизировала риски и сократила время простоя оборудования.

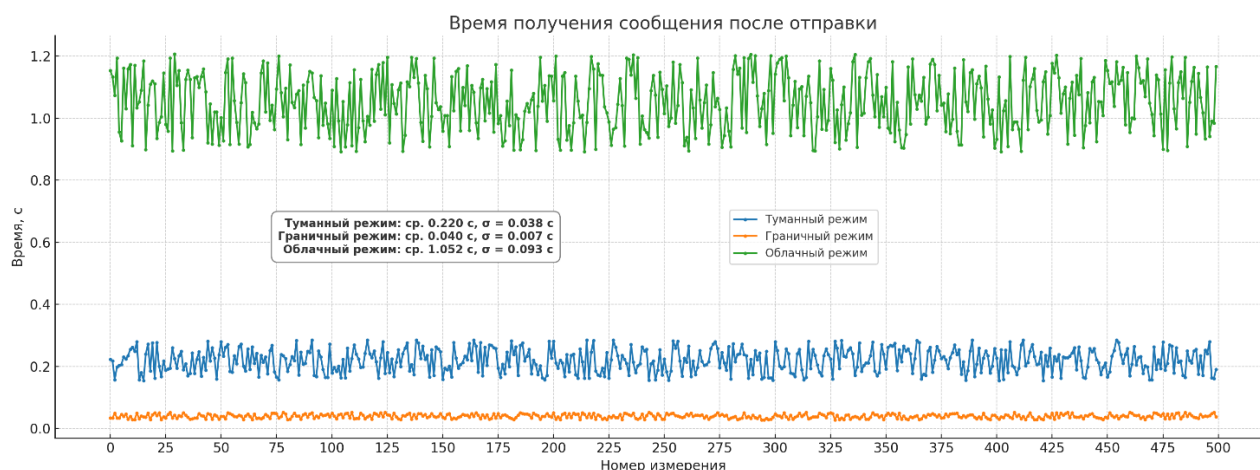


Рис. 2. Результаты исследований времени отклика в иерархической системе управления ГПС «Denford»

В результате выполненной работы разработана многоуровневая архитектура edge-fog-cloud для ГПС «Denford», которая интегрирует достижения предшествующих работ по облачному управлению на базе SAP HANA и интеллектуальному планированию на основе семантической базы знаний. Экспериментальные измерения подтвердили эффективность распределения функций управления между уровнями: edge-уровень обеспечивает управление в реальном времени, fog-уровень – координацию модулей, cloud-уровень – аналитику и оптимизацию. Показана применимость разработанной архитектуры для тестирования сценариев управления безлюдным производством изделий ракетно-космической техники с использованием аддитивных технологий электронно-лучевой наплавки. Полученные результаты могут быть масштабированы и использованы при проектировании систем управления на промышленных предприятиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Овсянников, М.В. Cloud system of pilot production management based on Internet of Things technologies [Электронный ресурс] / М.В. Овсянников, С.А. Подкопаев, В.Б. Тарасов // Scientific-technical journal. – URL: <https://slib.uz/en/article/view?id=7611> (дата обращения: 31.01.2026).
2. Овсянников, М.В. Облачная система управления производством в рамках жизненного цикла продукции на основе Интернета вещей / М.В. Овсянников, С.А. Подкопаев, В.А. Буханов // Вопросы инновационной экономики. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 1311–1318. – DOI: 10.18334/vines.10.3.110521.
3. Евгеньев, Г.Б. Интеллектуальная система управления ГПС / Г.Б. Евгеньев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 1–1 (103). – С. 67–74. – DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.1.009.
4. Kumar, R. Analysis of multi-dimensional Industrial IoT (IIoT) data in Edge-Fog-Cloud based architectural frameworks: A survey on current state and research challenges / R. Kumar, N. Agrawal // Array. – 2023. – Vol. 18. – Article 100224. – DOI: 10.1016/j.array.2023.100224.
5. Котов, А.К. Организация эффективного обмена данными в управлении безлюдным производством изделий ракетно-космической техники / А.К. Котов, В.С. Лагута // Компьютерно-интегрированные технологии: образование, наука, производство. – 2025. – № 51. – С. 76–82.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Михайлов А.Н., д.т.н., профессор, Огренич Д.В. [✉], аспирант

Донецкий национальный технический университет,
Донецкая Народная Республика, Российская Федерация
E-mail: dmitryogrenich@yandex.ru

Выполнен анализ результата неравномерных воздействий на лопатки в процессе их эксплуатации. Рассмотрен один из возможных вариантов технологического процесса ремонта и восстановления. Приведены особенности технологического процесса ремонта и восстановления на финишных операциях.

Ключевые слова: лопатка, ремонт и восстановление, газотурбинный двигатель, структура, технологический процесс

SOME FEATURES OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF REPAIR AND RESTORATION OF THE COMPRESSOR BLADES OF A GAS-TURBINE ENGINE

Mikhailov A.N., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Ogrenich D.V. [✉], PhD student

Donetsk National Technical University, Donetsk People's Republic, Russian Federation
E-mail: dmitryogrenich@yandex.ru

The article analyzes the effects of uneven loads on the blades during their operation. It considers one of the possible options for the repair and restoration process. The article also examines the features of the repair and restoration process in the finishing operations.

Keywords: blade, repair and restoration, gas turbine engine, structure, and technological process

Газотурбинные двигатели (ГТД) эксплуатируются в сложных условиях запыленности и в широком диапазоне температур, что приводит к интенсификации износа его отдельных частей. Наиболее важными и ответственными деталями ГТД являются лопатки. В процессе эксплуатации лопатки подвергаются износу под действием пыли, песка и мелких частиц. На поверхности лопаток возникают эрозионные повреждения, зоны коррозионного поражения, усталостные трещины, что приводит к ухудшению характеристик двигателя и повышению вероятности поломки и отказа.

Ремонт и восстановление лопаток ГТД является довольно перспективным направлением, в процессе работы лопатки подвергаются различным видам воздействий, что влечет за собой износ и разрушение поверхностей лопаток. В одном двигателе большое количество лопаток, а процесс изготовления новых лопаток является довольно трудоемким и дорогостоящим [1–4].

Цель работы – повышение эксплуатационных свойств лопаток компрессора ГТД посредством технологического обеспечения синтеза рациональной структуры технологического процесса ремонта и восстановления.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи: выполнить анализ особенностей результатов неравномерных воздействий на лопатки в процессе их эксплуатации, разработать структуру технологического процесса ремонта и восстановления и дать рекомендации для финишных операций технологического процесса ремонта и восстановления.

В процессе работы лопатки компрессора и турбины подвергаются различным видам воздействий:

- воздействия различных частиц;
- температурные воздействия;

- абразивные воздействия;
- эрозионные воздействия;
- коррозионные воздействия;
- комбинированные воздействия.

В процессе эксплуатации кроме воздействий внешней среды на лопатки влияют силовые факторы, определяемые самой конфигурацией лопаток и различные внешние силы (рис. 1).

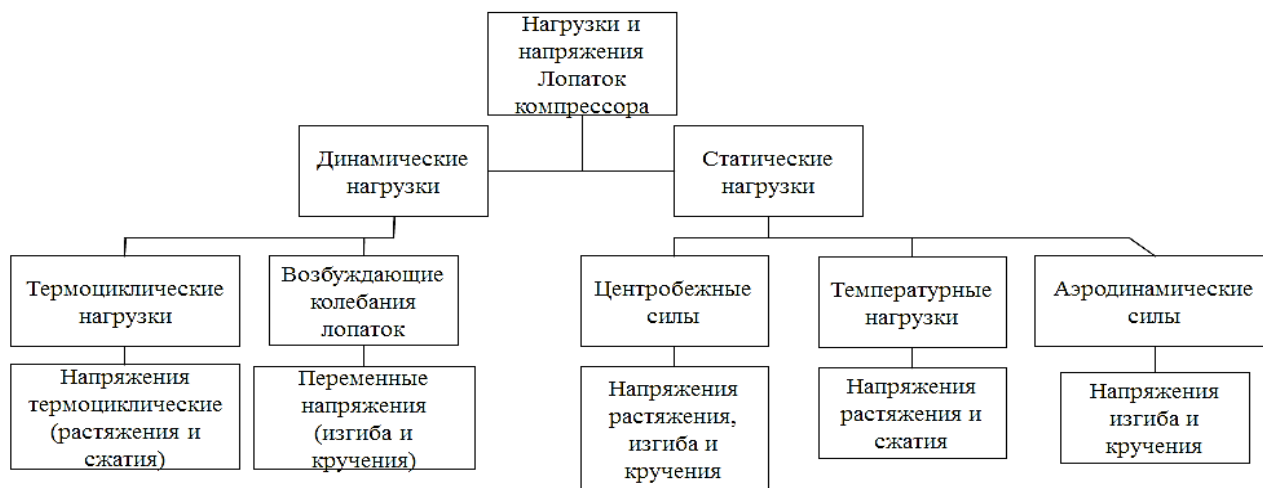


Рис. 1. Нагрузки и напряжения, действующие на лопатки [1]

Исследования показывают [2], что лопатки двигателя ТВ3-117 работают в неблагоприятных условиях, в процессе работы поверхность лопаток подвергается ударам инородных тел в виде песчинок и других неметаллических частиц, что ведет к абразивно-эрозионному повреждению и последующему усталостному разрушению.

Установлено, что по длине проточной части компрессора и, следовательно, на его выходе существенно увеличивается концентрация мелких частиц. Это в свою очередь связано как с конструкцией газотурбинного двигателя в целом и компрессора в частности, так и с кинематикой лопаток, что приводит к возникновению неравномерных следов износа на поверхности лопаток компрессора. Некоторые особенности износа рабочей лопатки компрессора показаны на рис. 2.

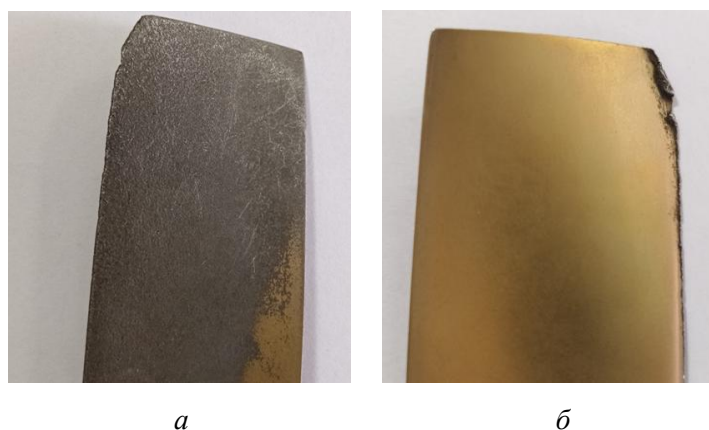


Рис. 2. Особенности износа элементов рабочей лопатки компрессора вертолетного ГТД:
 а – вид рабочей поверхности лопатки со стороны корыта,
 б – образование заусенцев на входной кромке со стороны спинки

На разрушение лопаток также могут влиять технологические повреждения, образованные во время изготовления или ремонта. Технологическими повреждениями являются: риски на поверхности, остаточные напряжения растяжения, трещины и другие концентраторы

напряжений. На выносливость рабочих поверхностей лопаток компрессора ГТД, работающих в условиях умеренно-повышенных температур и циклических нагрузок, влияет множество факторов, которые можно объединить в три основных группы: первая группа – конструктивные элементы, определяющие уровень концентрации напряжений сложнопрофильной формы лопаток, вторая – параметры микрогеометрии поверхности, третья – физико-механические свойства поверхностного слоя [3, 4].

Эксплуатационная нагрузка и воздействия в общем воспринимаются в основном поверхностным слоем лопаток. Следовательно, с большей вероятностью разрушается рабочая поверхность лопаток. Лопатки компрессора изготавливаются из титановых сплавов: ВТЗ-1, ВТ-6, ВТ8М, ВТ-8 и др. При разработке технологических процессов ремонта и восстановления исходят из необходимости обеспечения требуемых точности, формы поверхностей и относительного расположения. При этом геометрическая точность восстановленных лопаток связана с параметрами качества поверхности и поверхностного слоя: шероховатостью, величинами и распределением остаточных напряжений, глубиной и степенью наклепа, т. е. с теми параметрами, которые во многом определяют сопротивление усталости лопаток.

Технологический процесс ремонта и восстановления условно можно разделить на основные этапы:

- обработка перед процессом наплавления;
- технологический процесс наплавления;
- обработка лопаток для получения необходимой геометрии и свойств в поверхностном слое;
- нанесение износостойких многослойных ионно-плазменных покрытий.

Процесс состоит из множества операций и переходов; структура технологического процесса ремонта и восстановления представлена на рис. 3. V_i – входные параметры технологического процесса, а W_i – выходные параметры технологического процесса.

В первую очередь производится осмотр и дефектация лопаток. Для начала производится осмотр поврежденных рабочих поверхностей лопаток. Определяется степень повреждаемости. Повреждаемость – это совокупность характеристик, которые описывают изменение весовых характеристик, геометрических и физико-механических свойств. Далее лопатки подвергают дефектации. Дефектами детали называют различные отклонения, которые образовались в процессе износа. В процессе дефектации детали подразделяют на разные уровни в зависимости от степени износа из-за тех или иных факторов. Далее производят очистку поверхности лопаток от следов коррозии, эрозии и нагаров. В технологическом процессе очистки может применяться абразивно-струйная обработка для удаления оставшихся вкраплений нитрид-титанового покрытия на изношенной поверхности. Затем лопатки сортируются по степени износа и осуществляется предварительная обработка перед процессом наплавки (наварки), при котором происходит окончательная заполировка вмятин, забоин и следов абразивно-эрозионного разрушения. Далее лопатки попадают на участок для очистки в ультразвуковой ванне, что позволяет получить чистую поверхность. В зависимости от высоты загрузки ванны ультразвуковой установки и особенностей разрушения алюминиевой фольги, а следовательно, и разрушения различных видов загрязнений выбирается длительность ультразвуковой обработки изделий.

Затем происходит процесс наплавления (наварки), перед процессом наплавления необходимо решить множество сложных задач, в число которых входят: выбор термического режима выполнения наплавки; выбор материала, который позволит обеспечить свойства в зависимости от эксплуатационных функций; возможность наплавки данного материала на основной металл; выбор режима и способа наплавки, определение необходимой термообработки. Получение требуемых механических свойств наплавленного соединения достигается за счет выбора химического состава присадочной проволоки; система легирования должна быть близка к основному материалу. После наплавки для снятия внутренних напряжений следует применять термообработку «отжиг в вакууме».

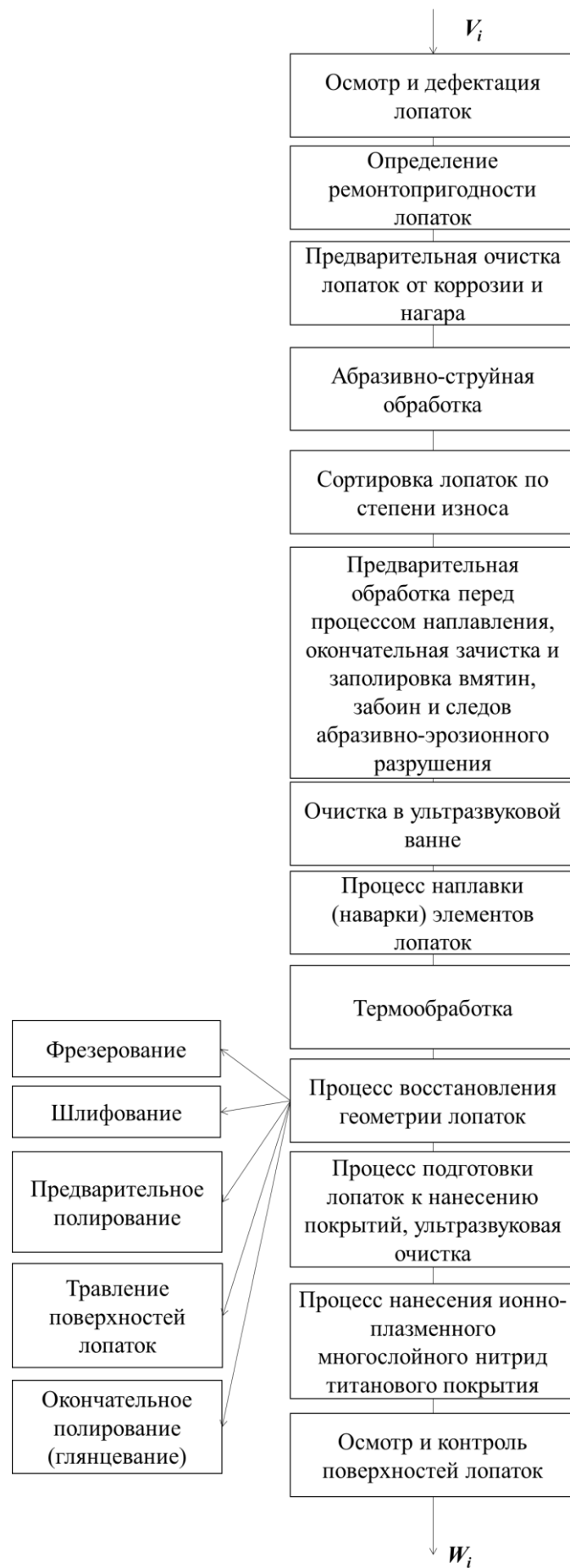


Рис. 3. Структура ТП ремонта и восстановления лопаток компрессора ГТД моделей ТВ3-117 и ВК-2500

Далее происходит процесс фрезерования, с поверхности лопатки удаляется лишний наплавленный слой. Лопатки компрессора имеют разные типоразмеры, но при этом они достаточно тонкие сами по себе и имеют тонкие входные и выходные кромки, из-за этого в процессе фрезерования может происходить деформация рабочих поверхностей лопаток, связанная со снятием неравномерного припуска как по длине, так и по ширине рабочей поверхности.

Следовательно, для исключения или частичного снижения этой неравномерности применяется процесс шлифования. В процессе шлифования устраняются дефекты фрезерования и лопатки максимально приближаются к теоретическому профилю. Во многом от процесса шлифования зависит трудоемкость последующих операций ручного полирования [5]. Важным фактором является то, что после процесса наплавления образованный слой может быть не совсем симметричным со стороны корыта и со стороны спинки. С учетом сложной геометрии лопатки в процессе шлифования может иметь существенное значение технологическая наследственность, для уменьшения влияния которой следует назначать равные припуски, если это представляется возможным. Рабочие поверхности лопаток компрессора после процессов фрезерования и шлифования полируют. Полирование необходимо для получения необходимой шероховатости, устранения технологических повреждений в виде рисок, остаточных напряжений растяжения, трещин и других концентраторов напряжений, образованных на предыдущих операциях, и формирования новых свойств в поверхностном слое.

Одним из важнейших условий успешного полирования титановых сплавов является отсутствие прижогов. После полирования лопатки подвергают процессу травления на отсутствие прижогов. Известно, что титановые сплавы имеют высокую адгезионную активность во взаимодействии с абразивным материалом. Вследствие этого в процессе шлифования и полирования (ленточное шлифование) абразивный инструмент серьезно загрязняется (засаливается), что в свою очередь может увеличивать количество прижогов на поверхности. Для борьбы с такими проявлениями могут применяться различные способы: сознательное уменьшение скорости резания, снижение температуры в зоне резания и очистка рабочей поверхности инструмента.

После травления лопатки подвергаются дополнительному процессу полирования, а именно глянецванию. При глянецвании шероховатость поверхности может достигать до $R_a = 0,2-0,3$ мкм. В процессе используются различные полировочные пасты, к примеру, полировочная паста «РИАЗ». Далее осуществляется подготовка к нанесению покрытий, которая состоит в ультразвуковой очистке лопаток. Затем происходит процесс нанесения многослойного нитрид-титанового покрытия ионно-плазменным способом. Для этого используется установка ННВ 6.6-И1.

На заключительном этапе выполняется контроль лопаток: проверяют отсутствие повреждений после обработки, измеряют основные размеры, шероховатость, радиусы входных и выходных кромок и т. д.

В данной работе были решены следующие задачи. Рассмотрены некоторые особенности технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора ГТД. Выполнен анализ особенностей неравномерного износа рабочих поверхностей лопаток. Разработана одна из возможных структур технологического процесса ремонта и восстановления. Даны рекомендации для финишных операций, а именно полирования и шлифования, а также для избегания технологических повреждений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Михайлов, А.Н. Основные особенности синтеза технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора ГТД / А.Н. Михайлов, Д.В. Огренич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2024. – № 4 (87). – С. 54–62. – EDN GMLYIP.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора: монография. В 2 частях. Ч. 1 / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк [и др.]. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 396 с.

3. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД / А.Н. Петухов. – Москва: Машиностроение, 1993. – 332 с.
4. Богуслаев, А.В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей / А.В. Богуслаев, Ал.А. Олейник, Ан.А. Олейник [и др.]; под ред. Д.В. Павленко, С.А. Субботина. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2009. – 468 с.
5. Полетаев, В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Полетаев. – Москва: Машиностроение, 2006. – 256 с. – (Библиотека технолога).

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ЛАЗЕРНЫМ ВЫРАЩИВАНИЕМ

Михеева Н.В.^{1✉}, аспирант, **Тимофеев А.Н.**², д.т.н., **Воейко О.А.**¹, к.т.н., доцент,
Неряхин В.С.², инженер

¹ Технологический университет им. дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова – филиал Московского государственного университета геодезии и картографии, г. Королев, Российская Федерация

² Акционерное общество «Композит», АО «Композит», г. Королев, Российская Федерация
E-mail: metrolog@kompozit-mv.ru

Представлены результаты применения объединенной модели управления качеством для перспективной аддитивной технологии прямого лазерного выращивания с интеграцией QFD в итеративный цикл улучшения O-PDCA. Отмечен положительный эффект, связанный с улучшением эксплуатационных свойств готовых изделий на примере выращивания из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: управление качеством, прямое лазерное выращивание, процессный и системный подходы, усовершенствованный цикл O-PDCA, развертывание функций качества Quality Function Deployment (QFD), дом качества

CONCEPTUAL MODEL OF QUALITY MANAGEMENT FOR DIRECT LASER-GROWED PRODUCTS

Mikheeva N.V.^{1✉}, PhD student, **Timofeev A.N.**², Grand PhD in Engineering Sciences,
Voeyko O.A.¹, PhD in Engineering Sciences, **Neryakhin V.S.**², engineer

¹ Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, Cosmonaut A.A. Leonov – branch of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Korolev, Russian Federation

² Kompozit Joint-Stock Company, JSC “Composite”, Korolev, Russian Federation
E-mail: metrolog@kompozit-mv.ru

The results of applying a combined quality management model for a promising additive technology of direct laser deposition with QFD integration into the O-PDCA iterative improvement cycle are presented. A positive effect on improving the performance properties of finished products is noted, using the example of aluminum alloy deposition.

Keywords: quality management, direct laser growth, process and system approaches, advanced O-PDCA cycle, Quality Function Deployment (QFD), Quality House

Прогрессирующее развитие аддитивной технологии прямого лазерного выращивания (далее – ПЛВ) позволяет получать сложнопрофильные крупногабаритные металлические изделия (до 3000 мм и высотой до 2000 мм), такие как негерметичные отсеки с вафельным фоном, наличие которого вызвано необходимостью снижения массы с сохранением прочностных свойств для ракетно-космической техники [1]. Основным преимуществом перед традиционными методами является изготовление отсеков целостной конструкции без сварных швов или заклепочных соединений за один непрерывный производственный цикл.

Качество изделий, получаемых ПЛВ, напрямую зависит от технологического процесса производства и исходных свойств порошкового материала, которые наследуются в готовом изделии. Геометрические размеры, структура, физико-механические свойства, а также наличие дефектов в детали являются результатом воздействия взаимосвязанных параметров синтеза. Традиционный контроль готовых изделий, созданных с применением аддитивных техноло-

гий, становится неэффективным и дорогостоящим. Функция контроля качества пассивна – это разделение продукции на годную и негодную. К тому же крупный размер деталей усугубляет проблему контроля по причине необходимости специальных методов и оборудования.

Система управления качеством является частью общей системы менеджмента организации и обеспечивает организационную структуру, координирующую решения для стратегического управления политикой и целями в области качества. Понимание ответственности руководства и правильное распределение выделенных ресурсов на ранних этапах непрерывного жизненного цикла выпускаемой продукции помогает достижению поставленных целей, включая удовлетворенность заказчика. Этапы процесса управления качеством представлены на рис. 1.



Рис. 1. Этапы процесса управления качеством

К настоящему времени информация об управлении качеством крупногабаритных изделий, получаемых методом ПЛВ, имеет разрозненный характер или противоречивые рекомендации, что в свою очередь может приводить к риску образования дефектов (пористости, трещинам, короблению, несплавлениям и пр.), снижению результативности и увеличению расхода материала и, соответственно, затрат. Таким образом, разработка модели управления качеством изделий, в особенности крупногабаритных, – крайне актуальная задача.

Долгосрочная стратегия постепенного, но непрерывного улучшения и повышения эффективности при полной ориентации на заказчика определяют основные принципы современного управления качеством продукции. Целью является создание продукции, соответствующей требованиям и обеспечивающей удовлетворение заказчика. На рис. 2 приведена упрощенная схема процесса изготовления изделий, полученных методом ПЛВ, которая учитывает запросы потребителя, с выделением этапа «Спрос», показывающего заинтересованность в продукции.

В данной работе рассмотрена возможность применения классических инструментов и методов по обеспечению и решению задач управления качеством в аддитивном производстве, основанных на процессном подходе, включающем в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001 цикл PDCA.

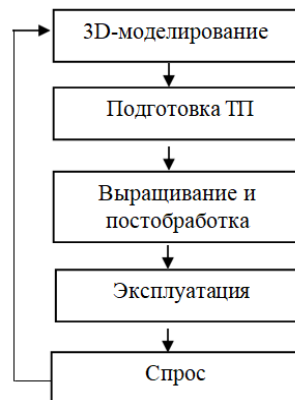


Рис. 2. Схема процесса удовлетворения общественных потребностей в изделии

PDCA определяется как непрерывный цикл процесса и философия управления для непрерывного совершенствования деятельности на организационном уровне [2, 3]. А проведенный анализ источников подтверждает его практическое применение в разных областях промышленности с положительными результатами в обеспечение снижения затрат и уменьшения дефектов. Например, компания Toyota интегрировала данный цикл в свою производственную систему Toyota Production System (TPS), что привело к снижению дефектов на 98 %, сокращение времени переналадки оборудования с нескольких часов до минут; росту производительности труда на 400 % за десятилетия [4].

В условиях развития цифровых технологий цикл PDCA (колесо Деминга) становится основой управления жизненным или производственным циклом изделия. Его итеративная природа, гибкость и адаптивность превращают в универсальный инструмент управления качеством.

Классический цикл состоит из 4-х этапов: «Plan – Do – Check – Act» – «Планируй – Делай – Проверь – Действуй» [5]. PDCA позволяет связать управление технологическим процессом и управление данными. Однако по причине того, что ПЛВ является многофакторным, сложным процессом, была разработана модель управления качеством крупногабаритных изделий, основанная на усовершенствованном цикле PDCA. Впервые для ПЛВ был предложен новый этап «Observe» – «Наблюдай», который предшествует этапу «Plan». Этот шаг включает в себя сбор необходимой информации для будущего планирования [2]. На этапе «Plan» перед началом фактического производственного процесса необходимо рассмотреть шаги: прогноз, распределение, решение [2].

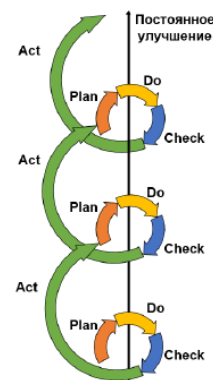
Предлагаемый модифицированный замкнутый цикл О-PDCA для ПЛВ (рис. 3, а) [6] заключается в системном подходе и позволяет борьбу с последствиями (наличие пористости) преобразовать в управление причинно-следственными связями через анализ первопричин для предотвращения повторного появления. А с переходом на новый цикл улучшения выводит качество на новый уровень, тем самым обеспечивая направленное восходящее движение по спирали (рис. 3, б).

Благодаря этапу «Observe» цикл становится более интеллектуальным и расширенным, способным масштабироваться под разные цели и задачи. Данный этап меняет подход к планированию («Plan»), выходящий за рамки формального сбора данных. «Observe» меняет парадигму: сначала понять, потом улучшить.

Благодаря анализу результатов и созданию «образцового аддитивного процесса» дополнительный этап также позволяет избежать ненужных изменений. А для ПЛВ систематическое «наблюдение» до любых управленческих решений дает максимальный эффект. Без этапа «О» последующий «Р» может основываться на предположениях. Благодаря целенаправленному сбору информации о текущем состоянии, т. е. о реальной картине, выявляются проблемы перед планированием. Главная цель модифицированного цикла заключается не в проверке решения проблемы, а глубоком понимании, изучении системы и получении новых знаний. Такой структурированный подход помогает улучшить качество процесса выращивания, основываясь на системном стратегическом планировании.



а



б

Рис. 3. Замкнутый цикл O-PDCA технологии ПЛВ (а); спираль качества (б)

Для модифицированного цикла O-PDCA подходит методология развертывания функции качества (QFD). QFD необходим для этапа планирования («Plan») и состоит из 4-х фаз с построением «дома качества» [7]. На рис. 4 представлен разработанный автором «дом качества», адаптированный к особенностям технологии ПЛВ. Данная методология позволяет не формализовать, а учесть и реализовать требования заказчика (т. е. «голоса потребителя») на всем производственном цикле изделия.

как что															
	CAD-модели	Стратегия стандартизации	Функциональный состав	Наличие информации	Сферичность	Точность	Массовая информация	Химический состав	Мощность лазерного излучения	Диаметр пятна лазера	Расход порошка	Стабильность подачи порошка	Скорость сваривания	Управляющая программа	Нагрев подложки
Внешний вид	●	○	○		○	○		●	●	●	●	●	●		○
Шероховатость		●						●	●	○	○	○	○		Δ
Геометр. размеры	Δ	○					●				Δ		○	Δ	●
Мех. свойства (предел прочности, предел текучести, отклонение, удлинение, твердость и пр.)		●	○	○		○	●	●	●	●	○	●	Δ		●
Пористость		●	○	○	○	○	●	●	●	●	○	●	Δ	Δ	●
Микроструктура		●					●	●	●	○	○	●		○	Δ
Остаточные напряжения		●					○	●	●	Δ		●	Δ	○	
Однородность (изотропия)	Δ	○	○	○		Δ	○	●	○	○	●	○	Δ	Δ	●
Сроки изготовления	●	○						●	●	●	Δ	●	○		○
Возможность реализации требований	●						●								

Рис. 4. Дом качества для технологии ПЛВ (● – сильная связь, ○ – средняя, Δ – слабая)

Для технологии ПЛВ встраиваемый в цикл O-PDCA QFD становится инструментом системного подхода для предотвращения последствий и ошибок при изготовлении изделий. Таким образом, QFD последовательно и структурированно детализирует «голос потребителя» и позволяет выделить критически влияющие параметры процесса на качество изделия.

В результате получаем замкнутую объединенную модель управления качеством с интеграцией QFD в итеративный цикл улучшения O-PDCA. Эффективность данной модели можно оценить через следующие факторы:

- показатели качества;
- снижение издержек;
- сокращение сроков изготовления;
- удовлетворенность заказчика.

O-PDCA задает направление на улучшение с детализированным планированием благодаря QFD. Данный подход способствовал снижению пористости на 48,7 % (начальная пористость образцов из алюминиевого сплава (определяемая по ГОСТ 9391) составила 1,60 %, с применением разработанной модели снизилась до 0,82 %), что соответствует требованиям заказчика – не более 1 %. Совместное применение двух методологий делает ПЛВ ориентированным на «голос потребителя». Объединенная модель универсального цикла управления со структурированным планированием позволяет обеспечить повышенное качество готовым изделиям, в том числе крупногабаритным, полученным методом ПЛВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Свидерский, В.П. Разработка технологического обеспечения изготовления тонкостенных крупногабаритных корпусных деталей летательных аппаратов с применением комбинированной деформирующей обработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02 / Свидерский Владимир Павлович. – Москва: Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ), 2004. – 37 с.
2. Enhancing Construction Project Workflow Reliability through Observe-Plan-Do-Check-React Cycle: A Bridge Project Case Study [Electronic resource] / A. Javanmardi, H. Chuanni, M.H. Simon, S.A. Abbasian-Hosseini, L. Min // Multidisciplinary Digital Publishing Institute: сайт. – 2023. – 10 aug. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/9/2379> (дата обращения: 13.01.2026).
3. Applying the Plan-Do-Check-Act (PDCA) Cycle to Reduce the Defects in the Manufacturing Industry. A Case Study [Electronic resource] / A. Realyvásquez-Vargas, K.C. Arredondo-Soto, T. Carrillo-Gutiérrez, G. Ravelo // Multidisciplinary Digital Publishing Institute: сайт. – 2023. – 10 aug. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/11/2181> (дата обращения: 13.01.2026).
4. PDCA in Manufacturing: Why Toyota Still Relies on This Simple Yet Powerful Problem-Solving Method [Electronic resource] // Orca lean: сайт. – 2025. – 26 feb. – URL: <https://www.orcalean.com/article/pdca-in-manufacturing:-why-toyota-still-relies-on-this-simple-yet-powerful-problem-solving-method> (дата обращения: 16.01.2026).
5. What is Plan-Do-Study-Act (PDSA) cycle? [Electronic resource] // American Society for Quality: сайт. – URL: <https://asq.org/quality-resources/pdca-cycle> (дата обращения: 16.01.2026).
6. Using the OPDCA cycle [Electronic resource]. – URL: <https://www.leadershipsucces.co/innovation-and-continuous-improvement/using-the-opdca-cycle> (дата обращения: 16.01.2026).
7. What is quality function deployment (QFD)? [Electronic resource] // American Society for Quality: сайт. – URL: <https://asq.org/quality-resources/qfd-quality-function-deployment> (дата обращения: 16.01.2026).

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ, СВЯЗЫВАЮЩЕЙ ТЕКСТУРУ И СВОЙСТВА

Назаров Д.В.^{1,2}, к.т.н., доцент

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: dennynaz@yandex.ru

Рассматривается методика построения мультифизических цифровых двойников функциональных поверхностей для установления количественной взаимосвязи между текстурой, технологией ее формирования и комплексом эксплуатационных характеристик деталей машин. Предложена трехуровневая архитектура модели, интегрирующая комплексное описание рельефа, пространственное распределение свойств подповерхностного слоя и систему расчетных модулей для прогнозирования мультифизического отклика на эксплуатационные нагрузки. Сформулирована система из шести базовых принципов построения таких моделей, обеспечивающих их технологическую обусловленность, многоуровневость и адаптивность. Предложенный подход апробирован на концептуальных примерах из области трибологии и контактной усталости, что подтверждает его практическую ценность для перехода от эмпирического контроля геометрических параметров к предиктивному управлению ресурсом на основе целевых функциональных показателей текстуры. Результаты работы закладывают научно-методическую основу для создания предиктивных систем управления качеством в цифровом производстве.

Ключевые слова: цифровой двойник поверхности, микрорельеф, мультифизическое моделирование, функциональные свойства, подповерхностный слой, предиктивное управление качеством, функциональные показатели текстуры

DIGITAL TWIN OF SURFACE MICRORELIEF BASED ON A MODEL LINKING TEXTURE AND PROPERTIES

Nazarov D.V.^{1,2}, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

² Samara Federal Research Center RAS, Samara, Russian Federation

E-mail: dennynaz@yandex.ru

The article discusses a methodology for constructing multiphysics digital twins of functional surfaces aimed at establishing a quantitative relationship between surface texture, the technology of its formation, and a set of operational characteristics of machine parts. A three-level model architecture is proposed, integrating a stochastic-deterministic description of the relief, the spatial distribution of subsurface layer properties, and a system of computational modules for predicting the multiphysics response to operational loads. A system of six fundamental principles for constructing such models is formulated, ensuring their technological determinacy, multi-scale nature, and adaptability. The proposed approach has been tested on conceptual examples from the fields of tribology and contact fatigue, confirming its practical value for transitioning from empirical control of geometric parameters to predictive resource management based on target functional descriptors of texture. The results lay the scientific and methodological foundation for creating predictive quality management systems in digital manufacturing.

Keywords: surface digital twin, microrelief, multiphysics modeling, functional properties, subsurface layer, predictive quality control, functional texture descriptors

Современное машиностроение сталкивается с кризисом традиционной парадигмы контроля качества поверхностей, основанной на нормировании среднестатистических параметров шероховатости, таких как R_a и R_z . Многолетняя практика свидетельствует об их неодно-

значной корреляции с ключевыми эксплуатационными характеристиками: износостойкостью, усталостной прочностью, герметичностью. К примеру, поверхности с идентичным значением Ra , но разной пространственной организацией неровностей (анизотропией, формой вершин, соотношением шага и высоты), демонстрируют радикально отличающееся поведение в условиях трения [1, 2]. Это обусловлено тем, что стандартные параметры не отражают функциональных аспектов текстуры: объема для удержания смазки, реальной опорной способности, характера концентрации напряжений [3].

Анализ существующих подходов к моделированию поверхностей выявляет их значительный разрыв [4]. С одной стороны, развиты статистические методы (автокорреляционные функции, спектральный анализ) и обусловленные конечно-элементные модели отдельных микровыступов. С другой – отсутствует универсальная методология, способная связать в единую цифровую цепочку полный жизненный цикл поверхности: от параметров технологического процесса формирования через 3D-геометрию и неоднородные поля свойств подповерхностного слоя до мультифизического отклика на эксплуатационные воздействия и итогового прогноза ресурса. Методы системного упрощения, хотя и снижают вычислительную сложность, часто теряют физическую адекватность на микроуровне.

Таким образом, актуальной задачей является разработка системных принципов построения мультифизических моделей нового поколения – цифровых двойников функциональных поверхностей (ЦДФП). Цель данной работы заключается в формулировке таких принципов и предложении архитектурного решения, которое ляжет в основу предиктивной системы управления качеством на этапах проектирования, производства и диагностики.

ЦДФП определяется как динамическая виртуальная модель, воспроизводящая не только геометрию микрорельефа, но и сопряженные с ней физико-механические поля подповерхностного слоя. Эта модель эволюционирует в виртуальном пространстве синхронно или с опережением реального объекта под воздействием имитируемых технологических и эксплуатационных факторов.

Как показано на рис. 1, архитектура ЦДФП базируется на трех фундаментальных информационных слоях:

- геометрический слой, представляющий собой трехмерное топографическое описание в форме облака точек, полигональной сетки или параметрической модели. Данные могут быть импортированы с помощью современных средств 3D-профилометрии или синтезированы алгоритмически с учетом технологии обработки;
- слой свойств материала, отражающий пространственное распределение ключевых характеристик: микротвердости, остаточных напряжений, модуля упругости, плотности дислокаций. Это распределение по глубине и вдоль поверхности является прямым следствием термосилового воздействия при обработке (шлифование, наплавка, пескоструйная обработка) и учитывает такие явления, как фазовые превращения, градиентный характер упрочнения;
- слой функциональных связей, содержащий набор математических моделей и алгоритмов, рассчитывающих отклик системы «геометрия + свойства» на внешние мультифизические воздействия (контактное давление, трение, тепловые потоки).

Сформулированы следующие шесть взаимосвязанных принципов, определяющих построение адекватных мультифизических моделей (рис. 2).

1. Принцип единства технологической детерминации. Модель должна явно учитывать генезис текстуры. Алгоритмы генерации геометрии и полей механических свойств являются первичными входными блоками, параметры которых однозначно задаются конкретной технологией. Например, для шлифования характерна направленная (анизотропная) текстура с выраженным градиентом твердости и растягивающими остаточными напряжениями в поверхностном слое, в то время как для пескоструйной обработки – изотропная текстура со сжатыми напряжениями в упрочненном слое.

2. Принцип многоуровневости и масштабирования. Адекватное моделирование требует учета явлений на разных масштабных уровнях. На макроуровне рассматривается деталь в сборе для определения макроконтakta и распределения номинальных напряжений. Проме-

жуточный уровень фокусируется на представительном объемном элементе, содержащем статистически устойчивые характеристики совокупности неровностей. Ключевой задачей здесь является корректный выбор размера элемента. Микроуровень необходим для изучения локальных процессов пластической деформации, дислокационной активности и зарождения микротрещин в зонах отдельных микроконтактов.

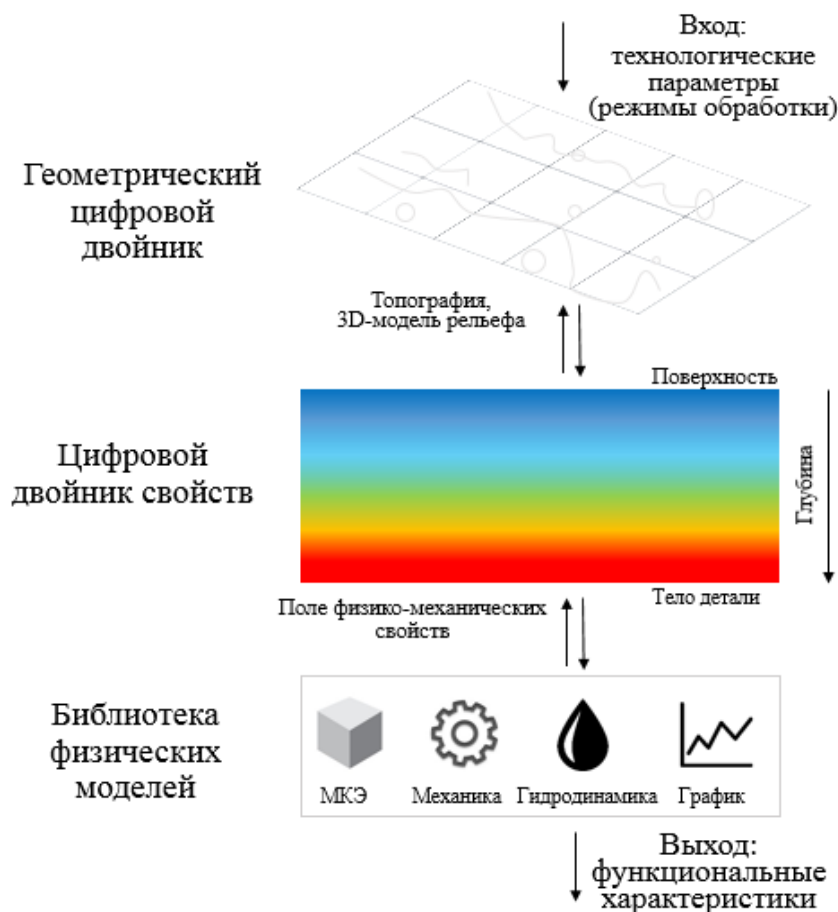


Рис. 1. Концептуальная архитектура цифрового двойника функциональной поверхности

3. Принцип комплексного описания геометрии. Рельеф функциональной поверхности предлагается описывать как суперпозицию двух составляющих. Первая составляющая моделирует регулярные элементы, целенаправленно созданные для выполнения функции (микроканавки для смазки, лунки для снижения износа). Вторая составляющая представляет собой фоновый шероховатый рельеф, описываемый случайными полями с заданными автокорреляционной функцией, спектром и распределением высот [5].

4. Принцип сопряжения геометрии и полей свойств. Поле механических свойств подповерхностного слоя неоднородно, и его вариации часто коррелируют с локальной геометрией (например, большая степень наклепа на вершинах выступов). Принцип предполагает сопряженное задание: каждому узлу дискретной геометрической модели ставится в соответствие вектор свойств

$$H(x, y, z) = f(P(x, y), T(x, y, z)), \quad (1)$$

где P – локальные параметры обработки (сила, температура);

T – хронология температурного воздействия в конкретной точке.

5. Принцип модульности и иерархии расчетных модулей. Архитектура вычислительного ядра должна быть организована по принципу «конструктора», позволяющего подключать необходимые модули под конкретную инженерную задачу. Базовый набор включает: модуль контактной механики, модуль трибологии, модуль механики разрушения, модуль герметичности.

6. Принцип обратной связи и калибровки по данным. ЦДП является не статичной, а адаптивной системой. Она должна непрерывно калиброваться и уточняться по потоку экспериментальных данных: результатам 3D-профилометрии, измерениям микротвердости, данным рентгеноструктурного анализа остаточных напряжений, результатам стендовых испытаний на износ и усталость. Для корректировки внутренних параметров модели и повышения точности прогноза эффективно применение методов машинного обучения.

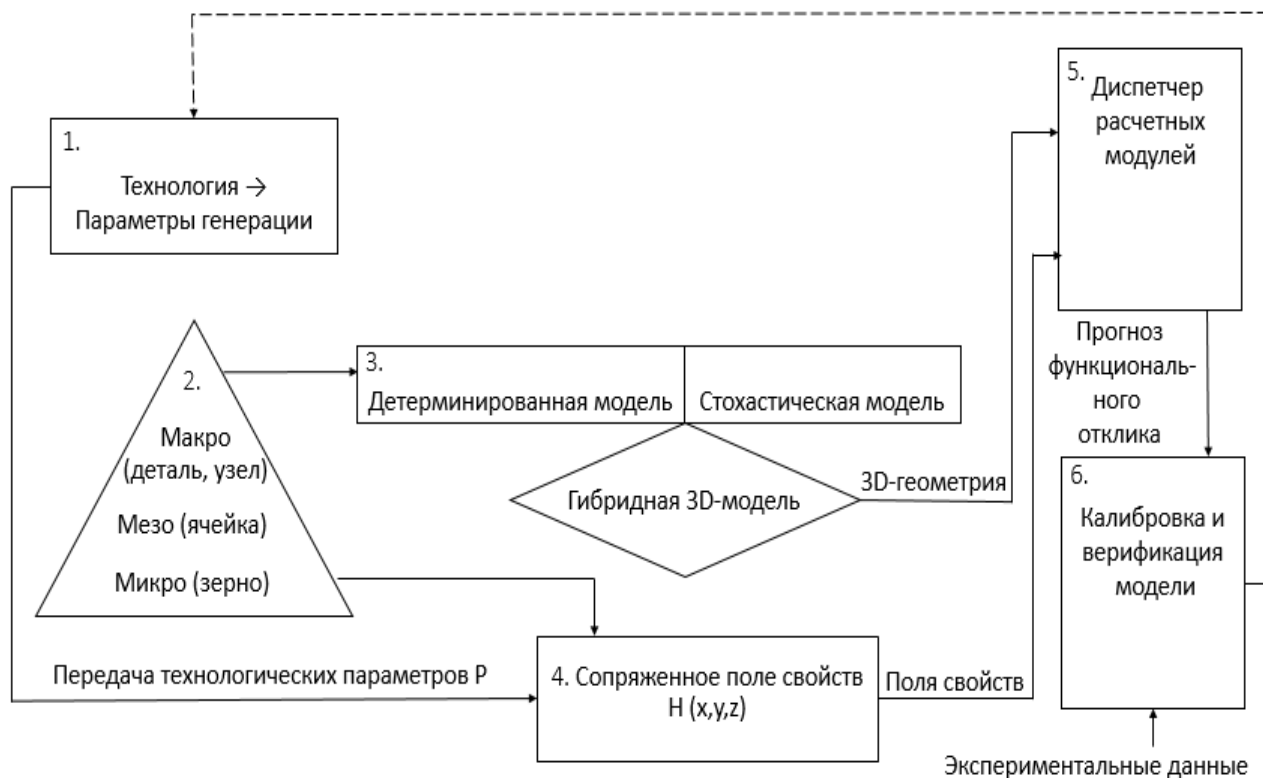


Рис. 2. Система принципов построения мультифизической модели и цикла ее калибровки

Техническая реализация сформулированных принципов воплощается в архитектуре специализированной вычислительной платформы. Ее работа организуется в виде последовательности блоков: ввод технологических параметров → генератор геометрии и полей свойств → препроцессор → диспетчер расчетных модулей → постпроцессор → модуль визуализации и база данных для хранения цифровых следов.

Разработанная методика открывает путь к трансформации системы управления качеством поверхности. Ключевым шагом является введение в техническую документацию вместо (или вместе) с параметрами Ra/Rz функциональных расчетных показателей, напрямую связанных с эксплуатационной характеристикой. Например, «объем смазочного клина», «интегральный коэффициент концентрации напряжений», «пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений, КИН [6]».

В рамках предиктивной системы ЦДФП становится инструментом для решения нижеследующих задач.

1. Виртуальное назначение допусков: определение того, какие отклонения в текстуре критичны для конкретной функции детали.

2. Оптимизация технологических режимов: подбор параметров обработки, гарантирующих получение поверхности с целевыми значениями функциональных свойств.

3. Прогностическая диагностика: оценки остаточного ресурса детали по данным неразрушающего контроля текущего состояния ее поверхности (например, по изменению 3D-топографии).

Очевидными ограничениями являются высокая вычислительная сложность полномасштабных мультифизических расчетов и необходимость создания обширных баз данных для калибровки моделей. Перспективы развития связаны с использованием технологий искусственного интеллекта для автоматической адаптации моделей в условиях реального производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (Госзадания) FMRW-2025-0052.

The work was carried out with the framework of the government order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FMRW-2025-0052).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – Москва: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2000. – 320 с. – ISBN 5-217-02976-5.
2. Инженерия поверхности деталей: учебное пособие / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов [и др.]. – Москва: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2008. – 320 с. – ISBN 978-5-217-03427-7.
3. Назаров, Д.В. Специфика формирования требований к параметрам текстуры поверхностей по функциональному назначению / Д.В. Назаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 267–274. – DOI: 10.24412/2071-6168-2025-12-267-268. – EDN VQEBEZ.
4. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – Санкт-Петербург: Питер, 2004. – 560 с.
5. Абрамов, А.Д. Построение цифрового изображения структуры поверхности по профилограмме для определения ее характеристик в соответствии с ГОСТ р ИСО 25178-2- 2014 / А.Д. Абрамов, Н.В. Носов, Т.Н. Андрюхина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25, № 4–2 (114). – С. 270–277. – DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-270-277. – EDN ORIYMN.
6. Королев, И.К. Конечно-элементное моделирование накопления повреждений и развития усталостной трещины в материале со стохастическим распределением сопротивления элементов микроструктуры / И.К. Королев, С.В. Петин, А.Б. Фрейдин // Труды ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова. – 2010. – № 53. – С. 59–66.

РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ АКСЕССУАРА ДЛЯ НАУШНИКОВ

Порфирьева А.В.[✉], студент, Подкругляк Л.Ю., к.т.н., доцент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: porfireva-a@list.ru

Выбран объект – основа для разработки эскиза и 3D-модели аксессуара для наушников «Сувенир-подставка». Определены область назначения и функциональные особенности изделия. С учетом сферы применения и геометрии изделия был определен материал и метод изготовления изделия.

Ключевые слова: аксессуар, эскиз, модерн, акриловый гипс, 3D-модель, способ изготовления

DEVELOPMENT OF A 3D MODEL OF AN ACCESSORY FOR HEADPHONES

Porfireva A.V.[✉], student, Подкругляк Л.Ю., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: porfireva-a@list.ru

An object has been selected as the basis for developing a sketch and 3D model of the “Souvenir Stand” headphone accessory. The purpose and functional features of the product are determined. Taking into account the scope of application and geometry of the product, the material and method of its manufacture were determined.

Keywords: headphone accessory, reference, modern, acrylic plaster, 3D model, manufacturing method

Стремясь слушать музыку с лучшим качеством звука и большим комфортом, все больше людей выбирают накладные наушники. С ростом количества пользователей подобных наушников возросло количество потребителей, нуждающихся в подставках для них. При использовании их в домашних условиях, как правило, перед нами встает вопрос: как можно практично и красиво разместить наушники на столе?

«Статуэтка-подставка» – это аксессуар, позволяющий удобно расположить накладные наушники, а также компактно хранить провод для их зарядки.

Референсом был выбран Посейдон в раковине, который служит декоративным элементом украшения доходного дома А.Ф. Нуйчева в Самаре (рис. 1). Вид у древнегреческого бога царственный, он не согнут под грузом, легко и величественно держит одной рукой балкон. Данное здание в Самаре является памятником архитектуры, возведенным в 1902–1904 гг. в стиле раннего модерна, и выделяется богато украшенным фасадом.

Статуэтка выполнена в стиле «модерн», поэтому достаточно легко впишется в любой интерьер, так как этот стиль универсален и сочетает в себе гармоничность и функциональность [1]. Таким образом, разработанное изделие имеет историю и будет служить отличным сувениром или подарком как для туристов, посетивших Самару, так и для местных жителей.

При создании эскиза учитывались функциональные особенности подставки и внесены некоторые изменения для создания более практичной и стабильной конструкции (рис. 2). Для придания фигуре симметричности было решено поднять Посейдону вторую руку и разместить на них опору для дужки наушников с растительным силуэтом. Также для устойчивости всей конструкции в качестве основы выбрали базу, характерную для коринфского ордера, что отлично сочетается с модерном, так как для него характерны асимметричные и природные формы.



Рис. 1. Посейдон в раковине

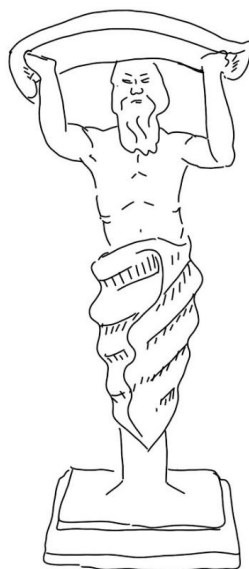


Рис. 2. Эскиз статуэтки-подставки

Геометрическая модель изделия была выполнена в программе Blender (рис. 3). Главным критерием при выборе программы являлось наличие инструмента цифровой лепки – скульптинга. Blender обладает множеством интуитивных кистей, что позволяет создавать детализированные 3D-модели с миллионами полигонов. Также можно выделить высокую скорость работы и широкий набор инструментов для моделирования, текстурирования и рендеринга. Помимо этого Blender обладает широкими возможностями постобработки деталей, программа проста в освоении и интуитивно понятный интерфейс не доставит проблем [2, 3].

Для изготовления изделия со сложной геометрией была выбрана акриловая смола. Это высокопрочный композитный материал, имеющий повышенную прочность, водостойкость и долговечность [4]. Сочетание данных качеств позволяет максимально передать структуру арт-бетона, из которого изготовлена лепнина.

Изготовление подставки начинается с печати модели при помощи высокотехнологичного фотополимерного 3D-принтера Creality HALOT-MAGE S 14K, предназначенного для профессиональной и любительской печати (рис. 4).



а



б

Рис. 3. Визуализация 3D-модели статуэтки-подставки:
а – без наушников; *б* – с наушниками

Печать фотополимером позволяет добиться максимально ровной поверхности готового изделия и отлично подходит для печати изделия со сложной геометрией [5].

При помощи напечатанной мастер-формы создается силиконовая литейная форма, которая послужит гибким и долговечным молдом для отливки из акриловой смолы, способным выдержать десятки и сотни заливок.



Рис. 4. 3D-принтер Creality HALOT-MAGE S

В результате работы была разработана 3D-модель подставки под наушники в стиле «модерн». Сочетая в себе плавные растительные формы и функциональность, данное изделие с легкостью впишется в современный интерьер. Изделие не только может реализоваться как античная скульптура-подставка, но и отлично подходит в качестве сувенира для туристов, посетивших Самарскую область.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Власов, В.Г. Модерн, «стиль модерн». – Новый энциклопедический словарь изобразительного искусства: в 10 т. / В.Г. Власов. – Санкт-Петербург: Азбука-Классика, 2006. – Т. V. – С. 556–577.
2. Работа с материалами в Blender [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.school-xyz.com/blog/rabota-s-materialami-v-blender>
3. Blender для скульпторов [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.blender.org/features/sculpting/#:~:text=Blender%20is%20for%20Sculptors&text=Experience%20the%20joy%20of%20sculpting,20%20different%20brush%20types>
4. Акриловый гипс [Электронный ресурс]. – URL: <https://clck.ru/3RWFik>
5. Фотополимерная 3D-печать. 3D-принтеры по технологии: LCD, SLA, DLP [Электронный ресурс]. – URL: <https://3d-diy.ru/blog/fotopolimernaya-3d-printery-po-tekhnologii-lcd-sla-dlp/?srsltid=Afm-BOorn55flkugByQrcivhq9AlR8ksgIKlWnuU9Vt5tiUqfl78ahW8N>

УПРАВЛЕНИЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Преображенский А.П., профессор, д.т.н., профессор, **Исакова С.М.**, студент,
Федосенко А.В., студент, **Тихонов И.А.**, студент

Воронежский институт высоких технологий, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: app@vivt.ru

Представлены основные характеристики киберфизической системы, которая используется на машиностроительном производстве. В качестве основного компонента рассматривается физическая подсистема, которая содержит в своем составе исполнительные механизмы, а также встроенные сенсоры, которые будут фиксировать ключевые параметры производственного процесса.

Ключевые слова: киберфизическая система, производство, управление, цифровой двойник, оптимизация, модель

CYBER-PHYSICAL SYSTEM MANAGEMENT IN MACHINE-BUILDING PRODUCTION

Preobrazhensky A.P., Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor,
Isakova S.M., student, **Fedosenko A.V.**, student, **Tikhonov I.A.**, student

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation
E-mail: app@vivt.ru

The paper discusses the main characteristics of a cyber-physical system that is used in machine-building production. The main component is a physical subsystem, which contains actuators, as well as built-in sensors that will record the key parameters of the production process.

Keywords: cyber-physical system, production, management, digital twin, optimization, model

Разработка модели управления киберфизической системой направлена на повышение эффективности технических объектов за счет оптимизации жизненного цикла. Основная цель – минимизация простоев, снижение затрат на обслуживание и энергопотребления. Для этого создается интеллектуальный механизм, обеспечивающий предиктивное обслуживание, адаптивное управление ресурсами и принятие решений в реальном времени.

В качестве основного структурного уровня выступает физическая подсистема, в состав которой входят исполнительные механизмы и встроенные сенсоры, фиксирующие ключевые параметры производственного процесса. К таким параметрам относятся, в частности, температура окружающей среды и обрабатываемого материала, частота вращения шпинделя, крутящий момент, степень износа инструмента и другие критически важные показатели. Полученные данные в режиме реального времени поступают в информационную подсистему, где подлежат предварительной обработке и подготовке к дальнейшему анализу [1, 2].

Информационная подсистема играет роль связующего звена между физической частью системы и ее аналитическим ядром. Она включает в себя модули сбора, фильтрации, нормализации и хранения данных, что позволяет обеспечить их пригодность для последующего использования в аналитических и управляющих алгоритмах. В текущем проекте для целей моделирования применяется синтетически сгенерированный датасет, содержащий 10 000 записей с четырнадцатью параметрами, имитирующими реальные условия работы оборудования.

Следующим ключевым элементом архитектуры является цифровой двойник, представляющий собой виртуальную модель фрезерной машины, способную воспроизводить ее поведение на основе актуальных данных. Благодаря интеграции с сенсорными потоками и ин-

формационной подсистемой цифровой двойник обеспечивает прогнозирование технического состояния оборудования, оценку вероятности возникновения отказов и апробацию различных сценариев обслуживания в виртуальной среде, что позволяет минимизировать вмешательство в реальный производственный процесс.

Аналитическое ядро системы формируют модели искусственного интеллекта, включающие алгоритмы машинного обучения, направленные на классификацию состояний оборудования, выявление скрытых закономерностей и предсказание вероятности отказа. Особенностью используемых моделей является их способность учитывать различия в режимах функционирования и динамически адаптироваться к изменениям параметров среды. Прогностические решения, генерируемые ИИ, служат основой для корректировки графиков технического обслуживания, а также оптимизации энергопотребления и загрузки оборудования [3].

Управляющая подсистема реализует механизмы исполнительного воздействия на оборудование на основании выходных данных ИИ-моделей и цифрового двойника. Это включает планирование и реализацию операций по техническому обслуживанию, настройку параметров работы и автоматическую передачу предупреждений или рекомендаций операторам. Таким образом, управляющая подсистема замыкает контур управления, обеспечивая обратную связь и реализацию рекомендаций в физической среде.

Интерфейс взаимодействия с оператором завершает архитектуру системы, предоставляя пользователю визуализацию текущего состояния оборудования, результаты прогноза отказов и предложенные меры воздействия. Основные составляющие интерфейса создаются с учетом требований по эргономичности функционирования системы.

Создание цифрового двойника с целью обеспечения процесса управления киберфизической системой может рассматриваться в виде ключевого этапа. Он направлен на то, чтобы обеспечить моделирование поведения и состояния физического оборудования в режиме, который приближен к реальному времени. Цифровой двойник фрезерной машины разработан на основе анализа параметров из синтетического датасета, который позволяет имитировать эксплуатационные характеристики. Созданная модель системы позволяет проводить отслеживание изменений в параметрах оборудования и реализовывать имитацию сценариев отказов.

Они вызываются износом инструмента, нарушением теплоотвода, перегрузками и другими неисправностями. Тогда возникают возможности для диагностики состояния оборудования и тестирования стратегии реагирования без вмешательства в реальный процесс. Результаты симуляций используются ИИ-модулями для прогнозирования критических событий и корректировки параметров. Датасет состоит из 10 000 записей с 14 признаками: температура, скорость вращения, крутящий момент, износ инструмента и качество продукции. Данные охватывают нормальные и аномальные режимы работы, обеспечивая реалистичное представление состояний оборудования.

Задача предсказания отказов оборудования в киберфизической системе сведена к бинарной классификации – определению наличия или отсутствия признаков потенциального сбоя. Для решения используется модель, обученная на подготовленном и нормализованном датасете, созданном на основе синтетического цифрового двойника.

Данные разделены на обучающую (80 %) и тестовую (20 %) выборки с использованием стратифицированного подхода для сохранения баланса классов. Это обеспечивает объективную оценку способности модели к обобщению. В исследовании применяются как простые модели (логистическая регрессия), так и сложные ансамблевые методы (случайный лес), способные учитывать нелинейные зависимости между признаками.

Оценка эффективности модели проводится по следующим метрикам:

- Accuracy – доля правильных предсказаний;
- Precision – точность выявления положительного класса;
- Recall – полнота обнаружения реальных сбоев;
- F1-мера – гармоническое среднее precision и recall, особенно важное при несбалансированных данных;
- ROC AUC – мера способности модели различать классы при разных порогах.

Для достижения максимального качества предсказаний и адаптации модели к конкретным условиям эксплуатации проводится оптимизация гиперпараметров, осуществляемая с использованием как традиционного перебора (Grid Search), так и более прогрессивного подхода в виде байесовской оптимизации. Последний позволяет существенно сократить количество требуемых итераций за счет использования вероятностной модели целевой функции.

Выводы, которые были получены на основе анализа важности признаков (Random Forest):

1. Крутящий момент (Torque [Nm]) – самый значимый фактор для модели. Это логично, поскольку изменения в крутящем моменте напрямую связаны с нагрузкой на оборудование и могут указывать на износ или потенциальные отказы.

2. Скорость вращения (Rotational speed [rpm]) – второй по важности параметр, который отражает интенсивность работы системы и тоже влияет на вероятность отказа.

3. Износ инструмента (Tool wear [min]) – важный показатель, связанный с состоянием оборудования, его износом и необходимостью замены.

4. Температура воздуха (Air temperature [K]) и температура процесса (Process temperature [K]) оказывают менее сильное, но все же заметное влияние, что подтверждает важность температурных условий для стабильной работы киберфизической системы.

Реализация созданной методики обучения и валидации моделей позволяет обеспечить комплексную, устойчивую и репрезентативную оценку функционирования ИИ-алгоритмов. Это дает возможности для формирования надежной основы для их внедрения в систему управления киберфизическими объектами в условиях реального времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванова, Т.Н. Методы машинного обучения в оптимизации жизненного цикла технических систем / Т.Н. Иванова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2023. – № 4. – С. 45–54.
2. Digital twin-based predictive maintenance for manufacturing systems: recent advances and challenges / F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, P. Ji // Journal of Manufacturing Systems. – 2023. – Vol. 64. – Pp. 423–438. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.06.015.
3. Nguyen, V. Bayesian Optimization for Accelerating Hyper-Parameter Tuning / V. Nguyen // 2019 IEEE Second International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Engineering (AIKE), Sardinia, Italy. – 2019. – Pp. 302–305. – DOI: 10.1109/AIKE.2019.00060.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рогожников И.А. [✉], аспирант, Елистратов К.М., аспирант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: rogozhnikov.ia@yandex.ru

Рассматривается влияние режимов резания на стойкость абразивных кругов при шлифовании сложнопрофильных деталей, в частности лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). Проанализированы основные закономерности износа шлифовальных кругов в зависимости от скорости резания, подачи, глубины шлифования. Показано, что рациональный выбор режимов резания позволяет существенно повысить стойкость абразивного инструмента, снизить вероятность термических повреждений и обеспечить стабильность качества обработки лопаток ГТД. Представлена расчетная методика оценки стойкости шлифовальных кругов при непрерывной и циклической правке.

Ключевые слова: шлифование, стойкость абразивных кругов, режимы резания, лопатки ГТД, износ инструмента, сложнопрофильные детали

THE INFLUENCE OF GRINDING PARAMETERS ON THE SERVICE LIFE OF ABRASIVE WHEELS IN THE MACHINING OF GAS TURBINE ENGINE BLADES

Rogozhnikov I.A. [✉], PhD student, Elistratov K.M., PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: rogozhnikov.ia@yandex.ru

The paper investigates the influence of cutting parameters on the wear resistance of abrasive grinding wheels in the grinding of complex-shaped components, in particular gas turbine engine (GTE) blades. The main wear mechanisms of grinding wheels are analyzed as a function of cutting speed, feed rate, and grinding depth. It is shown that a rational selection of cutting parameters makes it possible to significantly increase the durability of the abrasive tool, reduce the risk of thermal damage, and ensure stable surface quality during the machining of GTE blades. A calculation method for assessing the durability of grinding wheels during continuous and cyclic dressing is considered.

Keywords: grinding, abrasive wheel durability, cutting parameters, GTE blades, tool wear, complex-shaped components

Одной из ключевых проблем шлифования лопаток ГТД является ограниченная стойкость абразивных кругов, обусловленная высокой твердостью и вязкостью жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов, а также сложными условиями в зоне резания. Рабочая поверхность шлифовального круга и ее профиль являются сложными и непостоянными, имеющими разновысотные зерна, расположенные на различных расстояниях [1]. Частая правка и замена шлифовальных кругов приводит к снижению производительности и увеличению себестоимости обработки.

Целью данной работы является анализ влияния режимов резания на стойкость абразивных кругов при шлифовании лопаток ГТД и определение направлений повышения эффективности использования абразивного инструмента. Кроме того, в работе рассматривается применение расчетных зависимостей для предварительной оценки ресурса абразивного инструмента на стадии технологической подготовки производства.

Механизмы износа абразивных кругов при шлифовании лопаток ГТД. Стойкость абразивных кругов при шлифовании определяется совокупностью процессов, протекающих в зоне контакта инструмента с заготовкой. Основными механизмами износа являются:

– выкрашивание зерен под действием переменных нагрузок;

- засаливание рабочей поверхности круга в процессе шлифования;
- затупление абразивных зерен вследствие пластической деформации и микроскалывания;
- разрушение связки при повышенных температурах.

При обработке лопаток ГТД указанные механизмы проявляются неравномерно по длине профиля пера, что дополнительно осложняет прогнозирование стойкости инструмента. Неравномерность износа особенно хорошо видна на участках входной и выходной кромок, в которых условия контакта существенно отличаются от средних значений по поверхности пера.

Влияние режимов резания на стойкость абразивных кругов. Скорость резания оказывает значительное влияние на характер взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом. При увеличении скорости резания наблюдается снижение удельных сил шлифования, однако одновременно возрастает температура в зоне контакта. Повышенные температуры ускоряют процессы износа связки и способствуют засаливанию круга, что приводит к снижению его стойкости.

Для шлифования лопаток ГТД рациональные значения скорости резания должны выбираться с учетом теплофизических свойств обрабатываемого материала и типа связки абразивного круга.

Увеличение глубины шлифования приводит к росту контактных нагрузок на абразивные зерна. Это способствует повышению интенсивности микроскалывания и выкрашивания зерен, что, с одной стороны, может обеспечивать самозатачивание круга, которое способствует уменьшению дефектов [2], а с другой – приводит к его ускоренному износу.

Чрезмерные значения глубины резания вызывают резкое снижение стойкости круга и ухудшение стабильности процесса шлифования.

Подача определяет частоту взаимодействия абразивных зерен с поверхностью детали и влияет на тепловой режим процесса шлифования. При малых подачах возрастает время контакта зерен с заготовкой, что способствует их затуплению и засаливанию круга. Повышенные подачи увеличивают динамические нагрузки и могут вызывать преждевременное выкрашивание абразивных зерен [3].

Условия охлаждения. Эффективность подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) существенно влияет на стойкость абразивных кругов. Интенсивное охлаждение снижает температуру в зоне шлифования, уменьшает адгезию продуктов резания и замедляет процессы термического разрушения связки.

Методика расчета абразивных кругов для обработки лопаток ГТД. Для количественной оценки стойкости абразивных кругов при шлифовании сложнопрофильных лопаток ГТД в работе приведена методика, основанная на расчете удельного расхода шлифовального круга при непрерывной и циклической правке.

Обозначения (см. рисунок):

z – количество проходов;

l – длина рабочего пути при шлифовании (включая перебег);

n – частота вращения шпинделя;

$f_{\text{пр}}$ – подача правящего ролика (мм/об);

h – глубина профиля ролика;

b – высота шлифовального круга;

r_{max} – максимальный радиус шлифовального круга;

r_{min} – минимальный радиус шлифовального круга;

$d_{\text{п}}$ – посадочный диаметр;

$t_{\text{маш}}$ – время обработки;

$F_{\text{прод}}$ – продольная подача шпинделя (мм/мин) (скорость стола);

$R_{\text{оп}}$ – удельный расход на обработку одной лопатки на одной операции при непрерывной правке;

$h_{\text{цикл}}$ – глубина циклической правки;

$R_{\text{оп.цикл}}$ – удельный расход на обработку одной лопатки на одной операции при циклической правке;

k – количество обрабатываемых лопаток;

P – количество шлифовальных кругов на операцию.

$$R_{\text{оп}} = \frac{1}{F_{\text{прод}}} \cdot n \cdot f_{\text{пр}} \cdot z, \text{ мм},$$

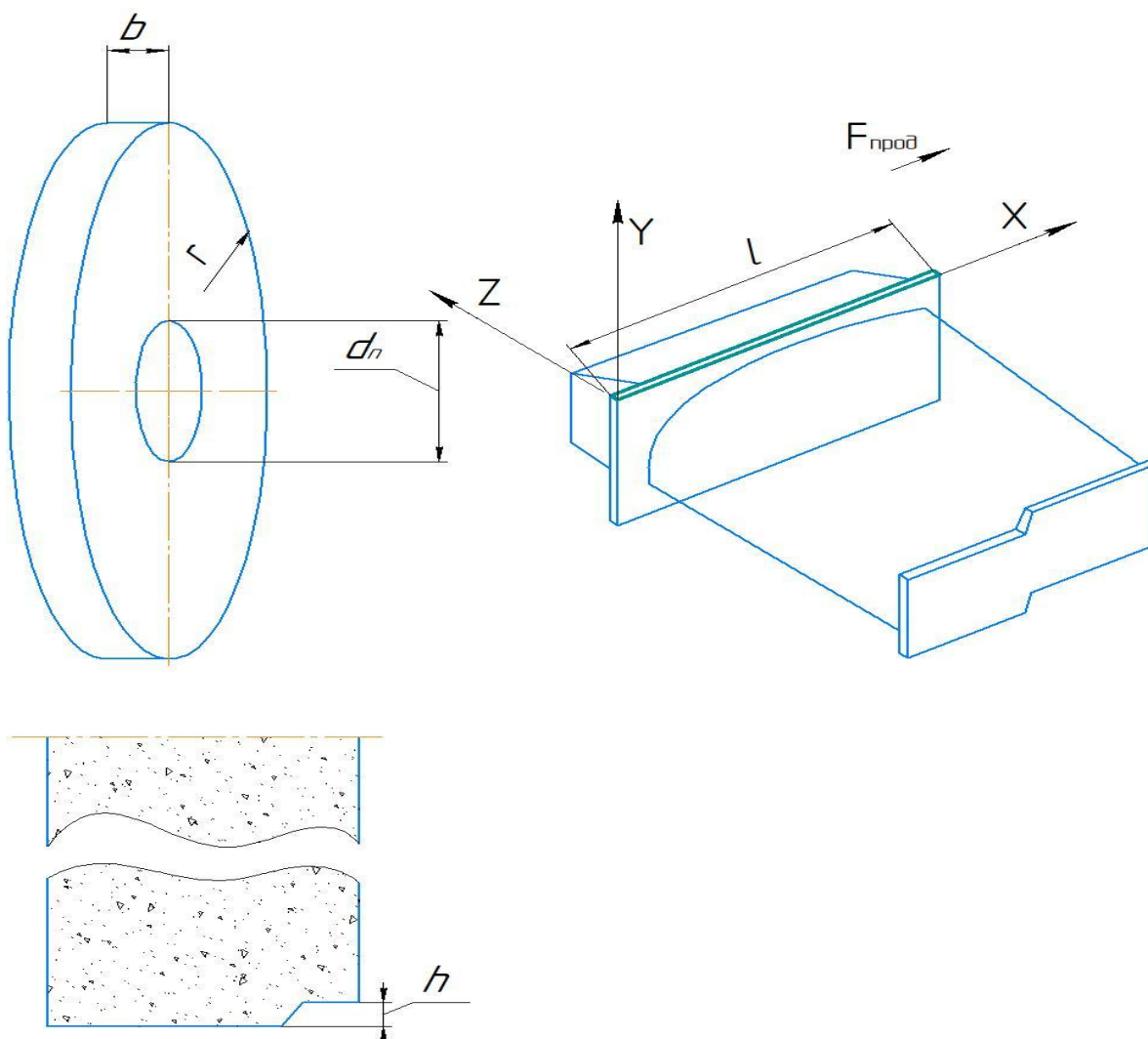
$$R_{\text{оп.цикл}} = \frac{1}{F_{\text{прод}}} \cdot f_{\text{пр}} \cdot z, \text{ мм};$$

для непрерывной правки:

$$P = R_{\text{оп}} \cdot \frac{k}{r_{\text{max}} - r_{\text{min}} - h}, \text{ шт.},$$

для циклической правки:

$$P = R_{\text{оп.цикл}} \cdot \frac{k}{r_{\text{max}} - r_{\text{min}} - h}, \text{ шт.},$$



Некоторые обозначения к методике расчета

Приведенная методика позволяет учитывать влияние режимов резания и параметров правки на фактический износ шлифовального круга и использовать полученные зависимости для обоснованного выбора режимов обработки лопаток ГТД с целью повышения стойкости абразивного инструмента.

Следует отметить, что ряд параметров ($t_{\text{маш}}$, b , $d_{\text{пос}}$) в рамках данной методики используются опосредованно либо служат для расширения расчетной модели. Это позволяет применять предложенный подход как для линейной, так и для объемной оценки износа шлифовальных кругов.

Особенности стойкости кругов при шлифовании сложнопрофильных поверхностей. При шлифовании лопаток ГТД наблюдается неравномерный износ абразивных кругов, обусловленный переменной кривизной профиля и изменением условий контакта по длине пера. Так как в процессе обработки изменяются площадь контакта, направление и величина сил резания, а также условия теплоотвода, в некоторых местах на абразивный инструмент оказывается повышенная нагрузка [2].

Кроме того, при многоосевой шлифовальной обработке лопаток ГТД положение абразивного инструмента относительно поверхности детали постоянно изменяется, что приводит к перераспределению нагрузок по рабочей поверхности круга.

В этой связи перспективным направлением является применение адаптивных режимов резания и профильных абразивных кругов, обеспечивающих более равномерный износ рабочей поверхности.

Таким образом, режимы резания оказывают определяющее влияние на стойкость абразивных кругов при шлифовании сложнопрофильных лопаток ГТД. Рациональный выбор скорости резания, подачи и глубины шлифования, а также обеспечение эффективного охлаждения позволяют существенно повысить ресурс абразивного инструмента и стабильность технологического процесса. Рассмотренная методика может быть использована для оценки расхода шлифовальных кругов при различных условиях правки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – Москва: Машиностроение, 1974.
2. Zhang, H. Influence of alumina abrasive tool wear on ground surface characteristics and corrosion properties of K444 nickel-based superalloy / H. Zhang, J. Li, Y. Wang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2022. – Vol. 35. – No. 6. – Pp. 339–351.
3. Marinescu, I.D. Handbook of Machining with Grinding Wheels / I.D. Marinescu, E. Uhlmann, T. Doi. – CRC Press, 2016.

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВКИ
И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ ИЗМЕНЕННОЙ КЛАПАННОЙ ПРУЖИНЫ ВАЗ-2108-1007020
НА ОСНОВЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

Скворцов А.Н., доцент, к.т.н., доцент

*Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,
г. Ижевск, Российская Федерация
E-mail: scv@istu.ru*

Представлены результаты исследований и разработок в направлении повышения надежности работы клапанной пружины ВАЗ-2108-1007020 за счет применения конструкторско-технологического подхода, заключающегося в одновременном изменении технологии получения заготовки и конструкции пружины. Изменение конструкции пружины заключается в использовании формы сечения проволоки стрелчатый квадрат без изменения установочных размеров. По результатам конечно-элементного анализа определено значительное изменение усилий, что должно привести к повышению надежности работы клапанов.

Ключевые слова: термомеханическая обработка, пружина, напряженное состояние, надежность

**ADVANCED METHODS OF PRODUCING A BLANKET AND FINITE ELEMENT
MODELING OF THE STRESS STATE OF A MODIFIED VALVE SPRING
VAZ-2108-1007020 BASED ON A DESIGN AND TECHNOLOGICAL APPROACH**

Skvortsov A.N., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation
E-mail: scv@istu.ru*

The paper presents the results of research and development aimed at improving the reliability of the VAZ-2108-1007020 valve spring by applying a design and engineering approach that involves simultaneously modifying the spring blank production technology and design. The spring design is modified to use a pointed square wire cross-section without changing the installation dimensions. Finite element analysis revealed a significant change in force, which should lead to improved valve reliability.

Keywords: thermomechanical processing, spring, stress state, reliability

В 2014–2016 гг. под руководством д.т.н., профессора О.И. Шаврина выполнялся проект на тему «Разработка и исследование процессов (технологий) получения стальных конструкционных наноматериалов и изделий из них» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Работа являлась продолжением 50-летних работ в рамках научной школы «Теория управления эксплуатационной надежностью и долговечностью деталей машин технологическими методами» в направлении термомеханического формирования наноразмерной субструктуры (ТДФНС). Одним из объектов исследований являлись винтовые цилиндрические пружины и проволока (в качестве заготовки). В рамках выполнения 4-го этапа проекта научным коллективом с участием индустриального партнера – ООО «УРПС» и соисполнителей было получено подтверждение повышения механических характеристик пружинных сталей после ТДФНС [1].

ТДФНС включало непрерывно-последовательно: индукционный нагрев ТВЧ, деформацию волочением в монолитной волоке, спрейерную контролируемую закалку в воде и отпуск образцов в печи. В качестве контрольных образцов применялись образцы

проволоки, прошедшие термообработку, включающую закалку в масле после нагрева в печи до температур 860 °С (сталь 51ХФА и 60С2А) и отпуск при температуре 220–460 °С (исследовательский этап). Результаты испытаний проволоки диаметром 2,8 мм из стали 51ХФА приведены в таблице.

Описание конструкторско-технологического подхода повышения характеристик винтовых цилиндрических пружин

Обзор способов волочения в роликовых волоках как достаточно эффективных методов пластической деформации длинномерных объектов проволоки/прутков представлен в литературе [2, 3]. Рассматриваются варианты волочения по схемам «круг – овал – круг», «круг – квадрат – круг», «круг – стрельчатый квадрат – круг» с различным количеством переходов. Также предусматривается назначение параметров процесса для обеспечения устойчивости деформируемого материала в зоне деформации. Весьма существенным является назначение глубины и радиуса вреза ручья.

Свойства образцов проволоки из стали 51ХФА, > 2,8 мм

Режим обработки	$T_{отп}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{в}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_{тп}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	Число перегибов	Число скручиваний
ОТО, $T_{нагр} = 860 ^\circ\text{C}$ печь, охлаждение в масле	460	1630	1530	1410	7,7	41	5	6
ТДФНС, 20 %, $T_{деф} = 900 ^\circ\text{C}$	240	2200	2050	1910	4,8	49	2	3
ТДФНС, 20 %, $T_{деф} = 930 ^\circ\text{C}$	240	2200	2045	2000	5,5	49	3	3
ТДФНС, 20 %, $T_{деф} = 960 ^\circ\text{C}$	240	2100	1980	1850	5,8	54	3	3
ТДФНС, 20 %, $T_{деф} = 1000 ^\circ\text{C}$	240	2200	2020	1900	4,6	51	2	2
ТДФНС, 20 %, $T_{деф} = 930 ^\circ\text{C}$	240	2200	2045	2000	5,5	49	3	3
	300	2180	2020	1900	6,7	50	3	4
	400	2150	2000	1880	9,5	50	5	6
	460	1630	1550	1470	10,5	51	6	7

Известны конструкции винтовых пружин с овальным (эллипсным) сечением витка (EP0377934, EP0596810, RU2357821, US2008191400, US2010090384) с различным отношением малого и большого радиусов, описывающих наружную поверхность.

Недостатком в применении к изготовлению винтовых пружин является значительная неравномерность напряженного состояния сечения витка при эксплуатации с концентрацией максимальных напряжений на внутренней поверхности, вызывающих усталостное разрушение или изменение геометрии и силовых характеристик, а также технологическая сложность получения необходимого сечения витка винтовой пружины при навивке (сложность ориентации).

Известны конструкции винтовых пружин с сечением витка в виде яйца (US2998242, US4953835, EP0143515A2), а также сечением витка, образованным сочетанием радиусных и эллипсных элементов (JPS60241535A, DE102004053445, US5259599). Их общим недостатком является технологическая сложность получения необходимого сечения витка винтовой пружины как при навивке (сложность ориентации), так и при изготовлении заготовки под навивку – проволоки/прутка.

На основании вышеизложенного, основываясь на системном подходе с учетом накопленного опыта изготовления винтовых цилиндрических пружин с термомодеформационным формированием наноразмерной структуры, автором были поданы заявки и получены Патенты РФ (2612104, 2739737).

Патент РФ 2612104 [4] может быть использован для получения заготовки – проволоки/прутка с целью последующего изготовления винтовых пружин. Используемый отпуск зависит от последующей технологии изготовления.

Патент РФ 2739737 [5] основан на конструкторско-технологическом подходе, а именно технологичной конструкции винтовой пружины (за счет применения сечения проволоки «стрельчатый квадрат»), расширении технологических возможностей способа волочения в роликовых волоках (за счет использования формообразования при высоких температурах) и повышении качества получаемой проволоки/прутка (за счет формирования наноразмерной структуры).

К достоинствам предлагаемого способа следует также отнести возможность его реализации в реверсивном режиме, что позволяет сократить затраты рабочего времени на подготовку и заправку проволоки в волочильную машину, а также установку и съём бунтов при однократном волочении.

Волочение в роликовых волоках в зависимости от сортамента и материала может производиться холодной деформацией, в нагретом состоянии, с регламентированным последующим деформационным охлаждением.

Реализация конструкторско-технологического подхода на примере клапанной пружины ВА3-2108-1007020

Клапанная пружина ВА3-2108-1007020, изготавливаемая по классической технологии, имеет следующие геометрические и эксплуатационные характеристики:

$d = 3,6$ мм, $D_2 = 30,4$ мм, $H_0 = 45$ мм, $n_{\text{раб.}} = 4$, $n_{\text{оп.}} = 1,5$, $H_3 = 21,6$ мм;

$H_1 = 33,7$ мм, $F_1 = 260$ Н;

$H_2 = 24,7$ мм, $F_2 = 462$ Н.

В соответствии с требованиями нормативной документации механические характеристики материала: сталь 51ХФА ГОСТ 14963-78, химсостав по ГОСТ 14959-2016, $\sigma_b = 1600$ МПа, $\sigma_t = 1520$ МПа.

При данных характеристиках в материале пружины в соответствии с ГОСТ 13765-86 будут возникать внутренние напряжения $\tau_3 = 1006$ МПа, что при перерасчете на нормальные напряжения по 4-й теории прочности $\sigma_t = 1670$ МПа. Полученное значение предела текучести указывает на использование напряженного состояния, т. е. проведение заневоливания в технологическом процессе.

Проектируемый вариант клапанной пружины ВА3-2108-1007020 изготавливается по вышеописанному способу (Патент РФ 2739737) с использованием термомеханически упрочненной проволоки: волочение в режиме ВТМО через роликовые волоки за 1 проход, отпуск, холодная навивка, закалка, стабилизирующий отпуск, заневоливание, обработка торцов.

В соответствии с требованиями по размещению пружины в штатном месте сохраняются наружный диаметр, высота в рабочем состоянии, габарит сечения витка. При сохранении высоты в свободном состоянии H_0 рабочее усилие P_2 составляет 588 Н (по ГОСТ 13765-86 для эквивалентного диаметра 3.88 мм). Основанием проведенного расчета могут быть рекомендации, изложенные в литературе [6]. При этом по результатам конечно-элементного моделирования с использованием стержневой модели пружины максимальные эквивалентные напряжения на поверхности пружины не превышают 1700 МПа, рабочее усилие 523 Н.

Механические характеристики материала принимаем из достигнутых свойств – $\sigma_b = 2000$ МПа, следовательно, $\sigma_t = 1700$ МПа.

Реверс-инжиниринг с использованием конечно-элементного анализа и твердотельного моделирования позволяет получить новую конструкцию пружины, в качестве критерия служат возникающие в материале пружины внутренние напряжения. Внешний вид пружины при рабочей деформации и заданной высоте H_3 приведен на рис. 1, 2.

Высота пружины в свободном состоянии составляет 50 мм, высота получена в результате конечно-элементного моделирования с учетом заневоливания с высоты 53 мм (после изготовления), появления пластических деформаций на внутренней стороне витка.

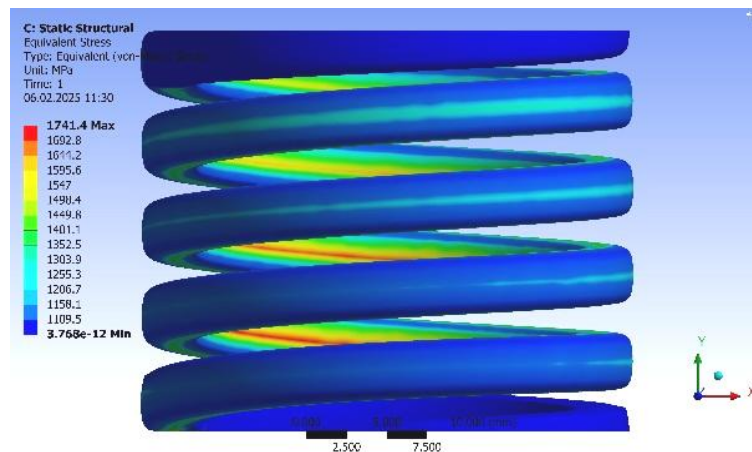


Рис. 1. Внешний вид клапанной пружины ВА3-2108-1007020 при рабочей высоте H_3

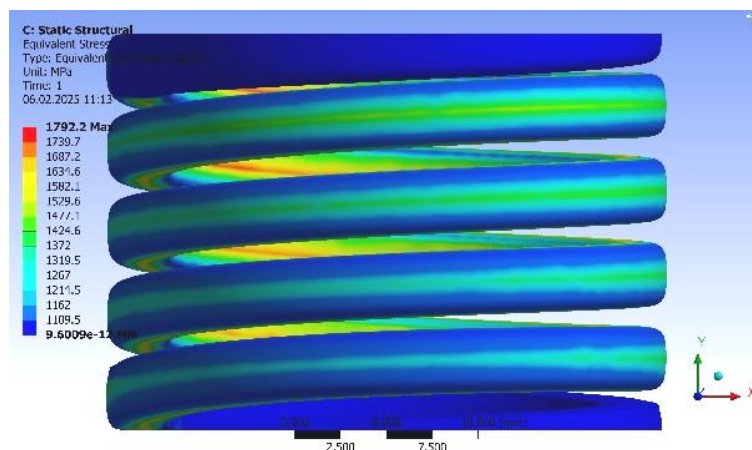


Рис. 2. Внешний вид клапанной пружины ВА3-2108-1007020 при заданной высоте H_3

Изменение конструкции и технологии изготовления привело к изменению силовых характеристик клапанной пружины ВА3-2108-1007020 без изменения установочных в узле: усилие рабочее – 700 Н, усилие предварительного поджатия – 460 Н.

Показанное ранее в работах научной школы профессора О.И. Шаврина по ТДФНС (ТМО) [7], повышение усталостной долговечности, релаксационной стойкости, снижение осадки в условиях циклического нагружения позволяет сделать заключение об увеличении надежности работы упругих элементов. Повышение усилий приведет к более надежной работе клапанов.

В случае ограничения усилий по условиям работы механизмов возможно изменение геометрических параметров клапанной пружины в направлении уменьшения размеров сечения или высоты в свободном состоянии за счет снижения количества рабочих витков.

Выводы

1. По результатам проекта на тему «Разработка и исследование процессов (технологий) получения стальных конструкционных наноматериалов и изделий из них» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» под руководством профессора О.И. Шаврина показано повышение комплекса механических характеристик образцов сталей 51ХФА.

2. На основании ранее выполненных работ автором подан и получен Патент РФ № 2739737 «Способ получения длинномерной заготовки для изготовления винтовой пружины, винтовая пружина и способ ее изготовления», который может быть положен в основу конструкторско-технологического подхода при проектировании и изготовлении винтовых цилиндрических пружин.

3. На основании конструкторско-технологического подхода приведен пример изменения конструкции клапанной пружины ВА3-2108-1007020 с учетом ТДФНС по Патенту РФ № 2739737; по результатам конечно-элементного анализа получено изменение:

- усилия предварительного поджатия с 260 Н до 460 Н;
- рабочего усилия с 462 до 700 Н;
- изменение высоты в свободном состоянии с 45 до 50 мм.

Показанное ранее в работах научной школы профессора О.И. Шаврина по ТДФНС (ТМО) повышение усталостной долговечности, релаксационной стойкости, снижение осадки в условиях циклического нагружения позволяет сделать заключение о повышении надежности работы упругих элементов. Повышение усилий приведет к более надежной работе клапанов.

В случае ограничения усилий по условиям работы механизмов возможно изменение геометрических параметров клапанной пружины в направлении уменьшения размеров сечения или высоты в свободном состоянии за счет снижения количества рабочих витков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка и исследование процессов (технологий) получения стальных конструкционных наноматериалов и изделий из них // Отчет о ПНИ за 4 этап (Соглашение № 14.577.21.0011). – Ижевск, 2016. – 136 с.
2. Пат. № 2329884 С1 Российская Федерация, МПК В21С 1/00. Способ волочения проволоки в роликовых волоках: № 2007100536/02: заявл. 09.01.2007: опубл. 27.07.2008 / Баричко Б.В., Выдрин А.В., Баричко В.С., Никитин А.В.; заявитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет».
3. Выдрин, А.В. Развитие схемы бескалнбрового волочения проволоки в роликовых волоках / А.В. Выдрин, Б.В. Баричко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2008. – № 9 (109). – С. 22–24.
4. Пат. № 2612104 С Российская Федерация, МПК В21С 1/00, В21В 1/16. Способ производства термоупрочненной проволоки из стали: № 2015126840: заявл. 03.07.2015: опубл. 02.03.2017 / Шаврин О.И., Скворцов А.Н.; заявитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова».
5. Пат. № 2704426 С1 Российская Федерация, МПК В21С 3/14. Способ производства длинномерных изделий из термоупрочненной стали с наноразмерной структурой и линия для его осуществления / Скворцов А.Н.; № 2018146664: заявл. 25.12.2018: опубл. 29.10.2019.
6. Пономарев, С.Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С.Д. Пономарев, Л.Е. Андреева. – Москва: Машиностроение, 1980. – 326 с.
7. Шаврин, О.И. Производство высокопрочных винтовых пружин / О.И. Шаврин. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2019. – 196 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Трофименко Н.Г., аспирант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: trofimenko-n@inbox.ru

Разработана модель образования шероховатости на криволинейных поверхностях при обработке ромбовидными СМП на станках с ЧПУ. Предложены аналитические зависимости по определению высоты неровностей профиля криволинейного контура заготовки заданного радиуса, которые позволяют скорректировать и задать подачу инструмента с определенной геометрией углов в плане СМП для обеспечения постоянной высоты микропрофиля поверхности.

Ключевые слова: шероховатость, обработка с ЧПУ, сферическая поверхность, точение, контур обрабатываемой детали, оси станка, пластины СМП, режимы резания

MODELING OF THE ROUGHNESS OF CURVED SURFACES DURING MACHINING ON CNC MACHINES

Trofimenko N.G., PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: trofimenko-n@inbox.ru

The article develops a model for the formation of roughness on curved surfaces during diamond-shaped NSR machining on CNC machines. Analytical dependences are proposed for determining the height of the profile irregularities of the curved contour of the workpiece of a given radius, which allow you to adjust and set the feed of the tool, with a certain geometry of angles in terms of the NSR to ensure a constant height of the surface profile.

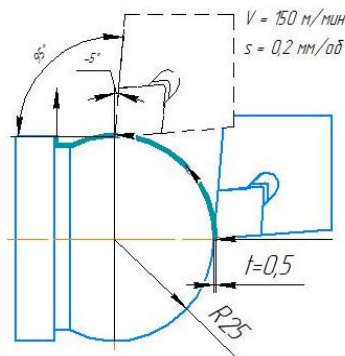
Keywords: roughness, CNC machining, spherical surface, turning, contour of the workpiece, machine axes, NSR plates, cutting modes

Особенностью токарной обработки конических и сферических поверхностей деталей является изменение скорости главного движения резания при постоянной частоте вращения шпинделя станка в связи изменением диаметра заготовки и геометрических параметров СМП главного и вспомогательного углов в плане [1]. Важен правильный выбор схемы (последовательности) снятия припуска на черновых и чистовых переходах, сочетание режимов резания и геометрии инструмента в зависимости от требуемой шероховатости поверхности заготовки, что является актуальной задачей при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ [2].

В процессе обработке криволинейных поверхностей изменяются высотные параметры профиля – R_a , R_z , R_{max} . Сферические поверхности, или же поверхности, контуром которых служит дуга, могут быть получены механически на токарном станке с ЧПУ путем перемещения инструмента за счет интерполяции координат Z , X при точении.

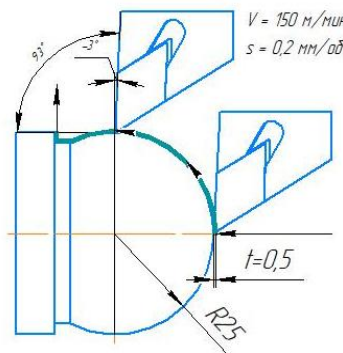
В работе проведены экспериментальные исследования процесса обработки сферической поверхности на станках с ЧПУ. Как правило, на таких операциях применяются пластины СМП – с соответствующими углами и радиусом при вершине. Угол при вершине режущей пластины СМП выбирался из каталога производителя по форме V (угол $\varepsilon = 35^\circ$), D ($\varepsilon = 55^\circ$), C ($\varepsilon = 80^\circ$), которые применяются при чистовом точении незакаленных сталей с радиусом при вершине 0,2–0,8 мм и $t = 0,5$ мм (рис. 1).

CNMG 120408 $r=0,8$ мм $\varphi=95^\circ$ $\varphi_1=-5^\circ$



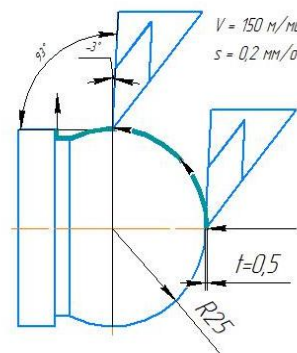
а

DNMG 150404 $r=0,4$ мм $\varphi=93^\circ$ $\varphi_1=-3^\circ$



б

VNMG 160402 $r=0,2$ мм $\varphi=93^\circ$ $\varphi_1=-3^\circ$



в

Рис. 1. Схема обработки сферической поверхности различными СМП:

CNMG 120408 с $r = 0,8$ мм, $\varphi = 95^\circ$, $\varphi_1 = 5^\circ$ (а); DNMG 150404 с $r = 0,4$ мм, $\varphi = 93^\circ$, $\varphi_1 = 3^\circ$ (б); VNMG 160402 с $r = 0,2$ мм, $\varphi = 93^\circ$, $\varphi_1 = 3^\circ$ (в). Режимы обработки: $V_p = 150$ м/мин, $t = 0,5$ мм, $S = 0,2$ мм/об

Для определения параметров шероховатости криволинейной поверхности – поверхности шара, обработанного ромбовидными СМП, разработана численная модель.

При численном моделировании за переменные приняты: высота неровностей H_A , которая формируется между главной и вспомогательной режущими кромками; подача s (мм/об), величина вертикального перемещения инструмента за оборот по оси $Y - Y\Delta h$. Эти параметры зависят от производной угла α_k° , изменяющегося в процессе обработки. Угол α_k° – это угол между осью обрабатываемой заготовки и касательной к дуге ее контура.

В зависимости от r , дуги обрабатываемого контура, строится график тангенса – касательная, h_{tg} , (мм) – величина тангенса, спроецированная на вертикальную ось Y станка:

$$h_{tg} = r_h \times \tan|\alpha_k|. \quad (1)$$

С помощью функции (1) определяем угол касательной.

$$|\alpha_k| = \arctan \frac{h_{tg}}{r_h}. \quad (2)$$

Касательная к дуге контура заготовки является графиком производной, построенным для кривой обрабатываемого контура радиусом r . Производная вычисляется как тангенс от угла α_k° (рис. 2).

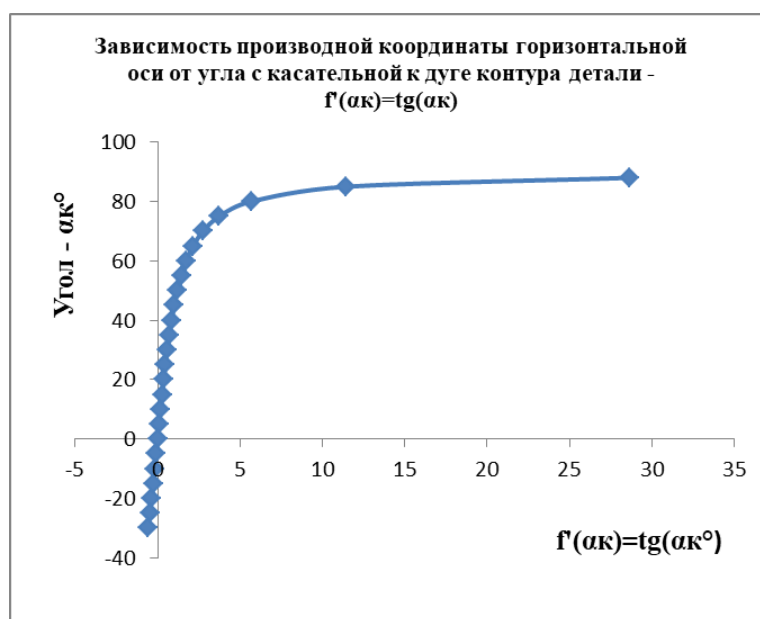


Рис. 2. Влияние угла α_k° на тангенс угла α_k°

На рис. 3 показана схема определения угла α_k° .

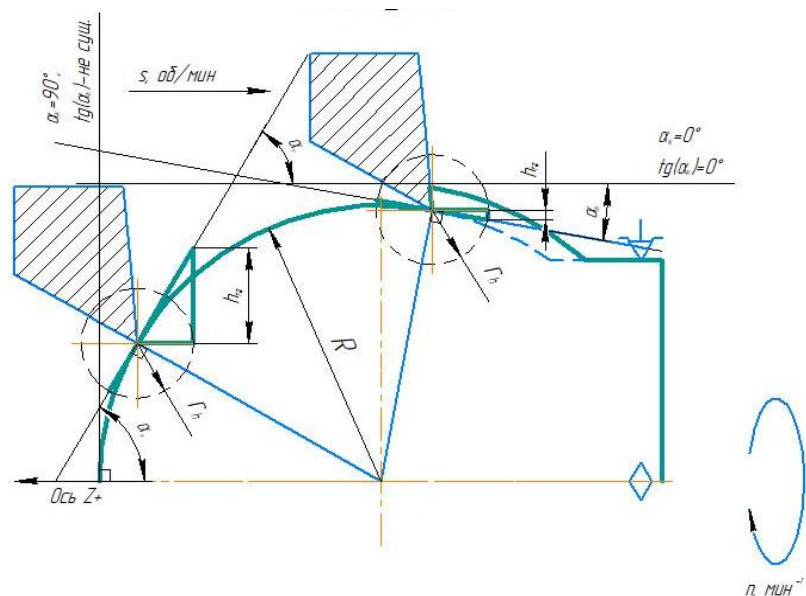


Рис. 3. Схема определения угла α_k° касательной к дуге контура

Сложением или вычитанием углов α_k и α_k' , полученных для положения инструмента в начале и по завершении витка, определяются параметры s и $Y\Delta h$ (рис. 4).

$$s = f(r, \alpha_k', \alpha_k); \quad (3)$$

$$Y\Delta h = f(r, \alpha_k', \alpha_k). \quad (4)$$

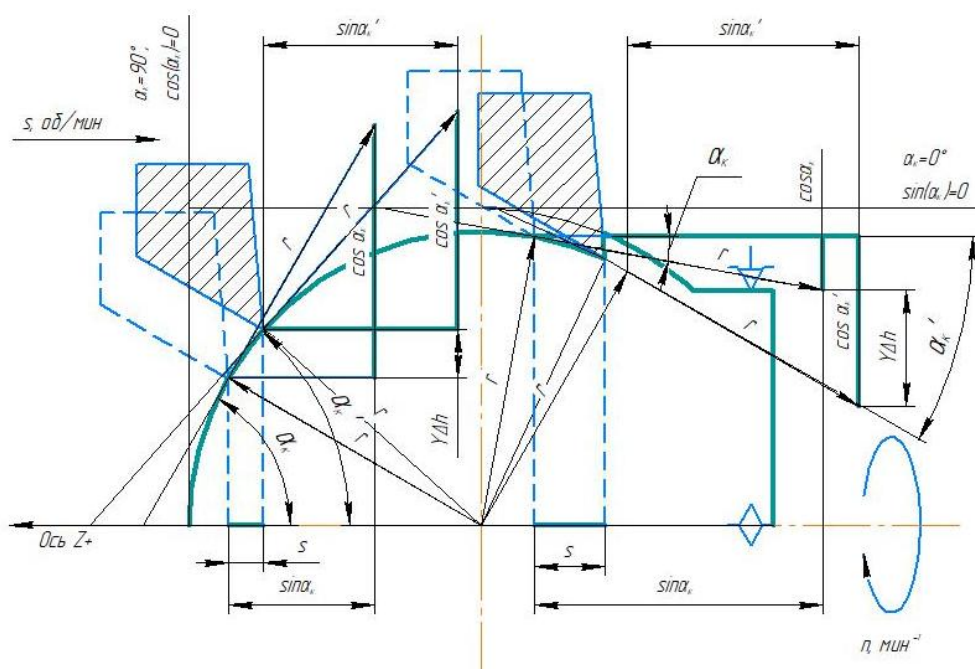


Рис. 4. Схема для определения s и $Y\Delta h$ исходя из углов $\alpha_k'^\circ$ и α_k°

Решением тригонометрической окружности с радиусом обрабатываемой заготовки, равным r , находятся s и $Y\Delta h$ – величина вертикального перемещения инструмента за оборот по оси Y .

$$s = r \times |(\sin|\alpha_k'| - \sin|\alpha_k|)|, \quad (5)$$

$$Y\Delta h = r|(\cos|\alpha_k'| - \cos|\alpha_k|)|, \quad (6)$$

По формулам можно определить один из углов, если известен другой угол, s и $Y\Delta h$.

$$|\alpha'_K| = \arcsin \frac{s-r \times \sin |\alpha_K|}{r}, \quad (7)$$

$$|\alpha'_k| = \arccos \frac{Y\Delta h + r \cos|\alpha_k|}{r}, \quad (8)$$

$$H_A = f(r, s, \alpha'_k, \alpha_{k'}). \quad (9)$$

Отрезок H_A коллинеарен r дуги контура обрабатываемой поверхности и вычисляется по теореме синусов из построения произвольного треугольника $\triangle O E' H$. Отрезок EE' соединяет вершины резцов в начале и по завершении одного оборота (рис. 5, а). Вычисляется по теореме Пифагора:

$$E'E = \sqrt{s^2 + Y_h^2}, \quad (10)$$

Для решения по теореме синусов требуется установить соответственно углы:

$$EHE' = 180 - (\varphi_1 + \varphi), \quad (11)$$

$$HEE' = \varphi - \arctan \frac{Yh}{s}, \quad (12)$$

Тогда по теореме синусов:

$$HE' = \frac{EE' \times \sin HEE'}{\sin FHE'}, \quad (13)$$

По теореме косинусов для треугольника $\triangle OE'H$ определим $OE' = r + H_A$:

при $\alpha'_k \in (0^\circ, 90^\circ)$:

$$OE'H = 90 + |\alpha'_x| + \varphi_1, \quad (14)$$

при $\alpha'_k \in (0^\circ, -\varphi_1)$:

$$OE'H = 90 + |\alpha'_x|, \quad (15)$$

$$H_A = (\sqrt{HE'^2 + r^2 + 2 \times HE' \times r \times \cos OE'H} - r) \times 10^3, [\text{ММ}]. \quad (16)$$

Для H_A при постоянном значении подачи может быть построен график (рис. 5, б).

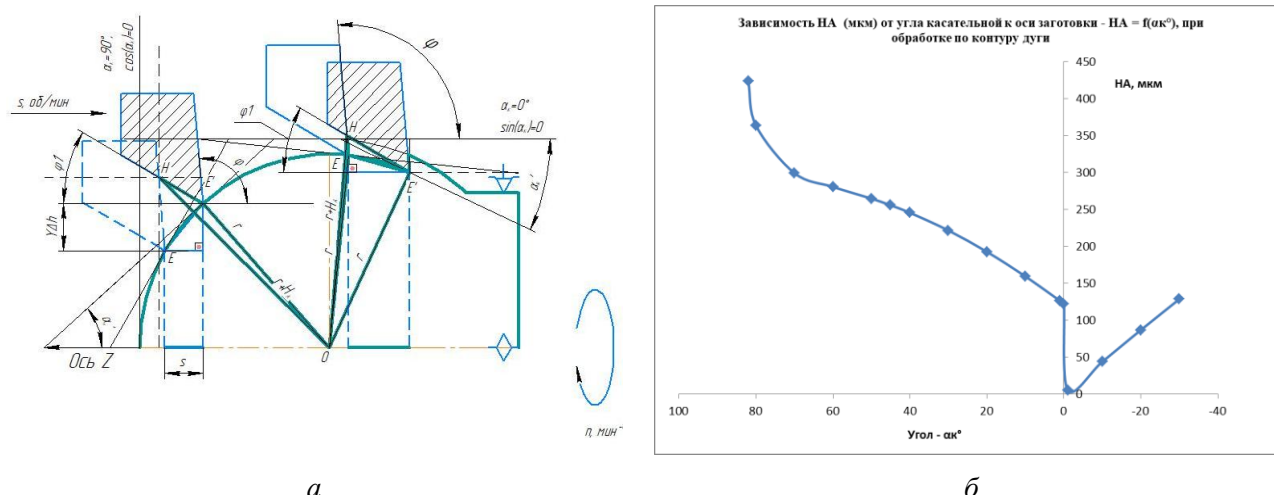


Рис. 5. Схема определения H_A (мкм) от угла α_k° (а).
Зависимость H_A (мкм) от угла α_k° при постоянной s (б)

Таким образом, разработана модель образования шероховатости на криволинейных поверхностях при обработке ромбовидными СМП на станках с ЧПУ. Пользуясь данным инструментом, можно аналитически определить высоту неровностей профиля криволинейного контура заготовки заданного радиуса, скорректировать и задать при проектировании процесса подачу инструмента, заменить его инструментом с другой геометрией углов в плане. Причем разработанная модель приспособлена для расчета при углах касательных к дугам кривых профиля как на участках возрастания, так и при убывании. Модель может быть скорректирована и улучшена по точности за счет незначительных усложнений расчетной части, учитывающих радиус при вершине инструмента, а также верифицирована с данными реально полученных профилограмм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грановский, Г.И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – Москва: Высш. шк., 1985. – 304 с.
2. Попов, Н.Н. Особенности обработки сферических и конических поверхностей деталей на токарных станках с ЧПУ / Н.Н. Попов, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов // Вестник Витебского государственного технического университета. – 2017. – № 1 (32). – С. 21–28.
3. Жеребятьев, Д.Н. Технологическое обеспечение требований точности деталей со сферическими поверхностями / Д.Н. Жеребятьев // Динамика систем, механизмов и машин: тез. докл. III Междунар. науч.-техн. конф. – Омск: ОмГТУ, 1999. – С. 31.

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Трофименко Н.Г. , аспирант, Носов Н.С., студент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: trofimenko-n@inbox.ru

Производительность процесса резания напрямую зависит от режимных параметров, одним из которых является скорость резания. Существенное увеличение скорости резания позволило бы многократно повысить эффективность производственных процессов. Однако препятствием этому служит целый ряд производственных факторов и нерешенных практических технических задач. Одной из таких задач потенциально является улучшение качества поверхности, которая будет получена при скорости резания от 10 м/с.

Ключевые слова: процесс резания, СМП, шероховатость, токарная обработка с ЧПУ, высокоскоростная обработка (ВСО), режимы резания

ROUGHNESS DURING HIGH-SPEED PROCESSING FLYING ON CNC MACHINES

Trofimenko N.G. , PhD student, Nosov N.S., student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: trofimenko-n@inbox.ru

The performance of the cutting process directly depends on the operating parameters, one of which is the cutting speed. A significant increase in cutting speed would significantly increase the efficiency of production processes. However, this is hindered by a number of production factors and unresolved practical technical problems. One of these is potentially the surface quality that will be obtained at a cutting speed of 10 m/s.

Keywords: cutting process, NSR, roughness, CNC, turning, high-speed machining, cutting modes

Высокоскоростная обработка металлических заготовок (ВСО) стала возможной только благодаря созданию современных высокопроизводительных станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Высокоскоростные токарные станки характеризуются предельно высокой частотой вращения шпинделя – более 50 тысяч об/мин при скорости подачи деталей 5000 мм/мин [1–2].

Главным преимуществом ВСО является высокая точность и скорость обработки заготовок, а недостатком – высокая стоимость. Как правило, высокоскоростной токарный станок с ЧПУ целесообразно применять лишь на завершающих этапах обработки деталей (чистовая обработка), а черновую обработку лучше проводить с помощью стандартных инструментов и привычных режимов резания.

Основное правило ВСО – малые сечения среза, снимаемые с большой скоростью, и создание системы эффективного удаления образующейся металлической стружки.

В настоящий момент машиностроение сделало огромный скачок в сфере ВСО, что связано с использованием новых станков с ЧПУ, применением прогрессивных режущих инструментов из новых инструментальных материалов с улучшенной геометрией. Однако нельзя сказать, что проблемы ВСО решены полностью. Условия рынка постоянно меняются и требуют совершенствования технологии производства с учетом требуемых характеристик, предъявляемых к качеству продукции и скорости изготовления при обязательном снижении себестоимости и энергозатрат.

Причина кроется в том, что скорость резания начинает превышать скорость теплопроводности обрабатываемого материала. Процесс съема стружки происходит настолько быстро, что тепло, генерируемое в зоне резания, просто не успевает распространиться на тело заготовки и инструмент. Подавляющая часть (до 80–90 %) тепловой энергии концентрируется в стружке и мгновенно эвакуируется вместе с ней. Например, если при скорости 100 м/мин температура стружки составляет около 450 °С, то при 1200 м/мин она может приближаться к температуре плавления материала (до 1500 °С), в то время как заготовка остается относительно холодной.

Основные причины эффективности процессов ВСО [2]:

- высочайшее качество поверхности: достигается низкая шероховатость (параметры R_a и R_z по ГОСТ Р 71448-2024), а также снижаются остаточные напряжения в поверхностном слое, что повышает усталостную прочность детали;

- снижение сил резания: малое сечение среза приводит к уменьшению радиальных и осевых сил, что минимизирует отжим инструмента и повышает точность обработки;

- стабильность и отсутствие вибраций: высокие частоты вращения шпинделя часто выводят систему за пределы частот собственных колебаний, что снижает вероятность возникновения вибраций и дробления;

- повышение стойкости инструмента: поскольку основное тепло уходит со стружкой, режущая кромка инструмента меньше подвергается термическим нагрузкам, что достигается при правильном подборе режимов обработки и геометрии инструментов.

В работе исследовалось влияние скорости резания при токарной обработке деталей на станках с ЧПУ на шероховатость поверхности. Скорость резания изменялась от 3 до 15 м/с. ВСО проводилась на токарном станке с ЧПУ Doosan PUMA 400. В качестве образцов применялись два вала из стали 30ХГСА по ГОСТ 4543-2016. Вал (диаметр 60 мм и длиной 300 мм) устанавливался в трехкулачковый патрон и поджимался вращающимся центром. Один образец имел твердость 28 HRC (состояние поставки), а второй прошел закалку в масле с отпуском и имел твердость 32 HRC.

Процесс ВСО осуществлялся за 1 проход с режимами: $t = 1,5$ мм, $S_o = 0,2$ мм/об, $V_{p1} = 150$ м/мин, длина обработки 15 мм, затем скорость менялась по программе $V_{p2} = 200$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p3} = 250$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p4} = 300$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p5} = 350$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p6} = 400$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p7} = 450$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p8} = 500$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p9} = 550$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p10} = 600$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p11} = 650$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p12} = 700$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p13} = 750$ м/мин, длина обработки 15 мм, $V_{p14} = 800$ м/мин, длина обработки 15 мм.

В качестве инструмента использовалась пластина СМП DNMG 150408, работа без охлаждения.

После ВСО проводились исследования шероховатости профиля поверхности на стационарном измерительном комплексе «Абрис ПМ7». На каждой шейке проводилось не менее 20 замеров и определялось среднее значение величины R_a , мкм. Шероховатость поверхности определялась оптико-электронным способом с помощью квазиоптимальных корреляционных алгоритмов [4].

Оптический метод позволял определять шероховатость поверхности размером 3×2 мм², который включал обработку не менее 1500 профилей по цифровому изображению. В этом случае величина R_a поверхности определялась по эмпирической зависимости

$$R_a = k \times A_{cp}, \quad (1)$$

где A_{cp} – амплитуда автокорреляционной функции, которая определялась по коррелограммам поверхностей;

k – коэффициент пропорциональности, равный 0,1, величина k зависела от размера эталона (от 10×10 Пк до 32×32 Пк), в нашем случае размер эталона составил 20×20 Пк.

Сравнение Ra профиля поверхности и Ra поверхности, полученного оптическим методом, показало, что величина Ra поверхности была выше на 20 %. Это связано с тем, что при обработке результатов использовалась площадь поверхности, а не профиль. Результаты экспериментальных исследований сравнивались с расчетами величины поперечной шероховатости по формуле Чебышева, которые составили $Ra = 2,0$ мкм.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1 и рис. 2.

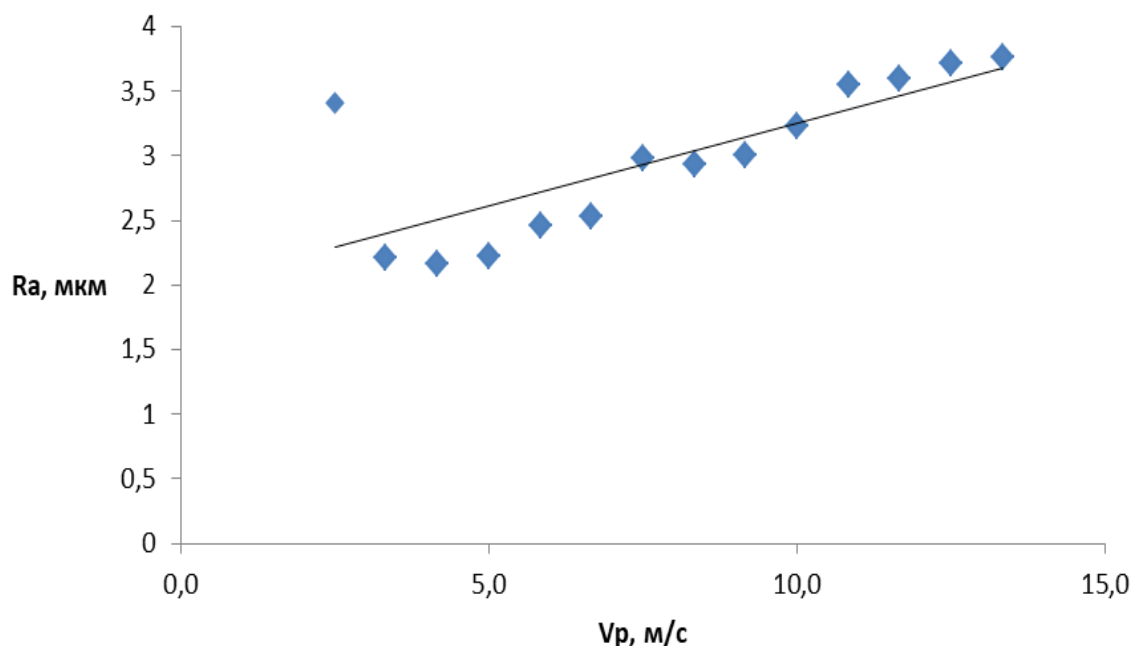


Рис. 1. Влияние скорости резания на шероховатость поверхности Ra при ВСО стали твердость 28 HRC

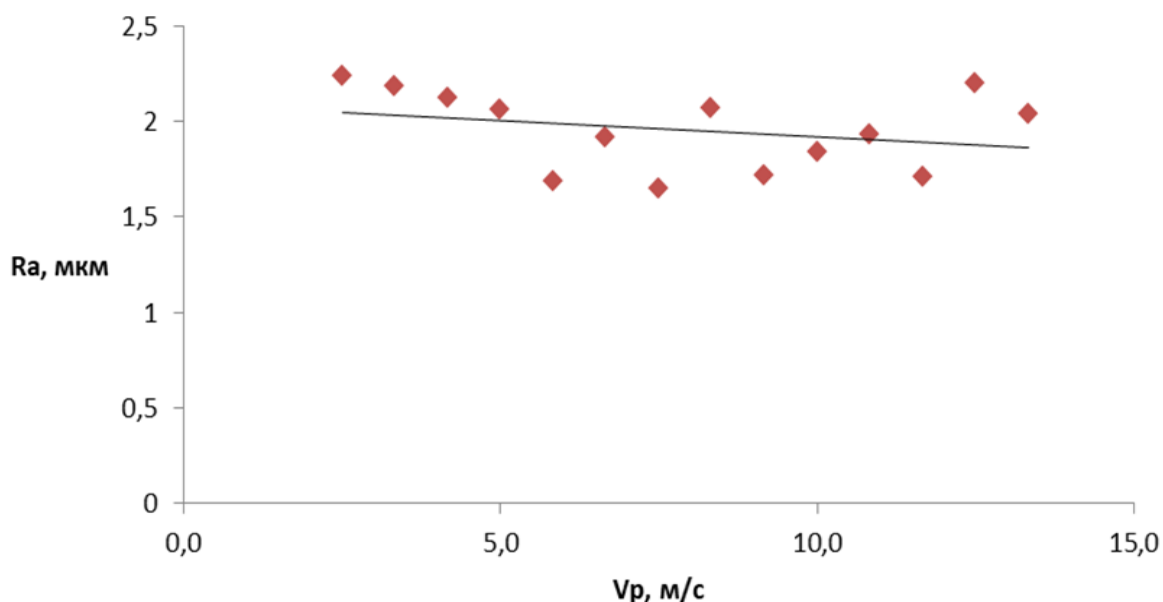


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности Ra от скорости резания при ВСО стали твердость 32 HRC

Исследования показали, что с увеличением скорости резания в три раза шероховатость поверхности увеличивается в 1,8 раза.

Это связано с тем, что при ВСО незакаленных сталей силы резания увеличиваются, растет температура процесса, ускоряется износ инструмента, появляются вибрации [3]. Авторы предлагают для уменьшения вибраций изменить геометрию СМП и перейти к резанию с положи-

тельными передними углами. Известно, что средний шаг микронеровностей поверхности связан с величиной подачи S_0 , которая в нашем случае составляет 0,2 мм/об. Исследования этого параметра по коррелограммам поверхности при ВСО незакаленных сталей показало, что изменение скорости резания с 3 до 15 м/с увеличило параметр S_m с 200 мкм до 250 мкм, а это является косвенным признаком появления вибраций.

ВСО закаленных сталей показала, что процесс резания более стабилен и увеличение скорости резания не приводит к существенному изменению параметров шероховатости поверхности Ra , которое колеблется от $Ra = 2,2$ мкм до $Ra = 1,8$ мкм (см. рис. 2). В этом случае заслуживает внимание тот факт, что величина S_m относительно расчетного значения снижается до $S_m = 180\text{--}140$ мкм, а это значит, что отсутствуют вибрации и формируются благоприятные условия резания.

Таким образом, при ВСО закаленной легированной стали со скоростью до 800 м/мин (13,3 м/с) шероховатость поверхности составляет $Ra = 2,0$ мкм, что характерно для поверхности, полученной при чистовом точении. При ВСО незакаленных материалов величина Ra повышается до 3,8 мкм, однако не выходит за границы допустимой Ra , составляющей 6,3 мкм, при полустовом точении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грановский, Г.И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – Москва: Высш. шк., 1985. – 304 с.
2. Кравченко, Б.А. Физические аспекты теории процесса резания металлов / Б.А. Кравченко, А.Б. Кравченко. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2002. – 167 с.
3. Насад, Т.Г. Высокоскоростная лезвийная обработка труднообрабатываемых материалов с дополнительными потоками энергии в зоне резания / Т.Г. Насад, А.А. Игнатьев. – Саратов: Саратов. гос. ун-т, 2002. – 112 с.
4. Абрамов, А.Д. Оценка параметров микрорельефа поверхностей деталей машин на основе квази-оптимальных корреляционных алгоритмов / А.Д. Абрамов, Н.В. Носов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 9. – С. 19–25.

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНТЕРФЕЙСОВ ОБЩЕГО ВИДА

Туляков В.В.^{1,2✉}, аспирант, ведущий инженер, Степанов Д.В.¹, к.т.н., доцент

¹ Астраханский государственный технический университет,

г. Астрахань, Российская Федерация

² Филиал ПАО «Россети Юг» – «Астраханьэнерго»

E-mail: vtulyakov84@yandex.ru

Предлагается концепция универсальной модели данных для преобразователя интерфейсов, обеспечивающей абстрагирование от конкретных сред передачи информации и протоколов взаимодействия. Реализация предлагаемой модели базируется на объектно-ориентированной парадигме с использованием языка программирования C++ в качестве средства описания интерфейсных контрактов [1, 2]. Предлагаемая архитектура позволяет декларативно описывать характеристики взаимодействующих интерфейсов, определять правила трансформации данных между ними и осуществлять маршрутизацию информационных потоков в распределенных гетерогенных системах [3]. Рассматриваемое решение нацелено на повышение степени повторного использования компонентов преобразователей, снижение временных затрат на интеграцию разнородных систем и обеспечение безопасности типов данных при преобразовании форматов данных [4, 7].

Ключевые слова: универсальная модель данных, преобразователь интерфейсов, абстрагирование от среды передачи, модульное построение систем, система типов, механизм преобразования

DEVELOPMENT OF A THEORETICAL DATA MODEL FOR A GENERAL-PURPOSE INTERFACE CONVERTER

Tulyakov V.V.^{1,2✉}, PhD student, Lead Engineer,

Stepanov D.V.¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

² Branch of PJSC "Rosseti Yug" – "Astrakhanenergo"

E-mail: vtulyakov84@yandex.ru

This article proposes a concept of a universal data model for an interface converter, providing abstraction from specific information transmission media and interaction protocols. The implementation of the proposed model is based on the object-oriented paradigm using the C++ programming language as a means of describing interface contracts [1, 2]. The proposed architecture allows for the declarative description of interacting interface characteristics, the definition of data transformation rules between them, and the routing of information flows in distributed heterogeneous systems [3]. The considered solution aims to increase the degree of reusability of converter components, reduce time costs for integrating heterogeneous systems, and ensure type safety during data format conversions [4, 7].

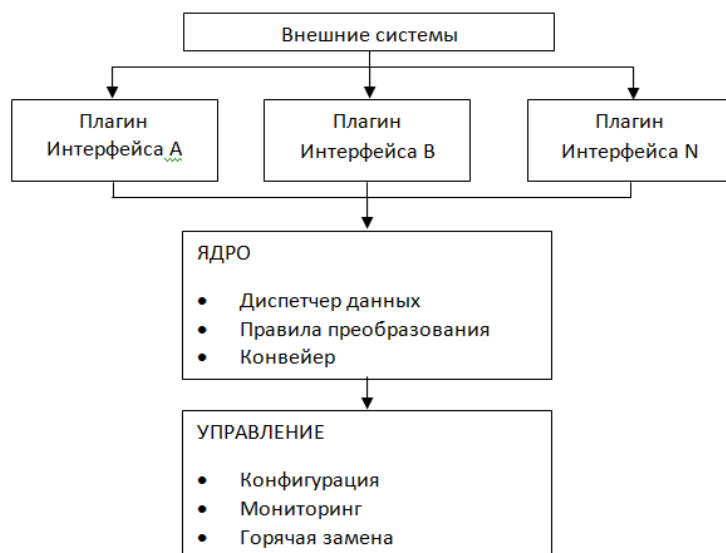
Keywords: universal data model, interface converter, transmission medium abstraction, modular system construction, type system, transformation mechanism

Современные распределенные системы требуют интеграции компонентов с разнородными интерфейсами. Традиционные преобразователи обладают высокой степенью связанности с конкретными протоколами, что затрудняет их расширение и поддержку [5, 6]. Предлагаемая модель решает эту проблему через полное абстрагирование от физической реализации интерфейсов, обеспечивая единый подход к их описанию и преобразованию на основе объектно-ориентированной парадигмы с использованием языка C++ [1, 3]. Концептуальной основой рассматриваемой модели является разделение трех аспектов интерфейсного взаимо-

действия: транспорта, формата данных и семантики преобразований. Ключевой инновацией является представление любого интерфейса как набора операций над потоком байтов, сопровождаемого формальным метаописанием его структуры [3, 4].

Ядром модели выступает «интерфейсный дескриптор» – объект на языке C++, описывающий структуру данных интерфейса в терминах типизированных полей, их расположения, размеров и ограничений. Дескриптор инкапсулирует логику сериализации/десериализации, валидации и нормализации данных, поддерживая как статические, так и динамические форматы [1, 2, 4]. Вторым ключевым элементом является система «правил преобразования», определяющих отображение между элементами различных интерфейсов. Правила могут включать простые операции копирования, сложные вычисления, условную логику и поддерживают комбинирование в цепочки преобразований. Особенность системы – строгая типовая безопасность, предотвращающая семантически некорректные преобразования [4, 7].

Архитектура предлагаемой модели преобразователя построена по модульному принципу, где каждый интерфейс представлен плагином, реализующим единый абстрактный контракт (см. рисунок). Центральный диспетчер данных координирует потоки информации между зарегистрированными интерфейсами на основе декларативной конфигурации, содержащей таблицы соответствий и правила маршрутизации. Подсистема трансформации реализована как конвейер стадий обработки, где каждая стадия соответствует одному правилу преобразования. Такая организация обеспечивает параллельную обработку независимых потоков данных и простоту расширения функциональности. Для критичных по производительности операций предусматриваются оптимизированные реализации распространенных преобразований (изменение порядка байтов, масштабирование, фильтрация). Система управления в составе рассматриваемой концепции преобразователя обеспечивает динамическую реконфигурацию преобразователя без остановки работы, включая горячую замену интерфейсов, модификацию правил преобразования, адаптацию к изменяющимся нагрузкам. Для повышения отказоустойчивости необходима разработка механизмов самодиагностики и самовосстановления, целью которых является автоматическое выявление и корректировка аномалий в работе компонентов.



Концептуальная схема модели

Данные представляются как последовательности байтов произвольной длины с сопровождающей метаданной (идентификатор источника, временная метка, контекст). Интерфейсный дескриптор обеспечивает семантическую интерпретацию этих последовательностей через описание структуры в терминах именованных полей. Механизм преобразования реализует многоуровневый подход: синтаксические преобразования (изменение формата представления), структурные преобразования (изменение композиции данных) и семантические

преобразования (адаптация к доменной специфике). Поддержка инкрементальных преобразований позволяет разбивать сложные преобразования на цепочки простых, повышая «понимаемость» и облегчая отладку.

Система типов обеспечивает безопасность преобразований, гарантируя совместимость операций на уровне типов данных. Статическая верификация правил на этапе конфигурирования выявляет потенциальные проблемы (типовые несовместимости, циклические зависимости) до их проявления в рабочей системе. Практическую значимость и применение предлагаемая модель найдет в областях, требующих интеграции разнородных систем: промышленная автоматизация (адаптация Modbus, PROFIBUS, EtherCAT) [5], интернет вещей (согласование MQTT, CoAP, HTTP) [6] и телекоммуникации (преобразование сигнальных протоколов).

Основные преимущества включают: снижение затрат на разработку за счет повторного использования дескрипторов и правил преобразования; улучшение наблюдаемости распределенных систем через централизованный сбор метрик; повышение надежности за счет встроенных механизмов валидации и отказоустойчивости; поддержку эволюции систем через постепенное обновление форматов с сохранением обратной совместимости.

Дальнейшее развитие предлагаемой модели связано с расширением выразительных возможностей языка описания интерфейсов, оптимизацией производительности через JIT-компиляцию правил и векторную обработку, разработкой формальных методов верификации корректности преобразований. Интеграция с машинным обучением позволит автоматизировать выявление закономерностей в потоках данных и генерацию правил преобразования. Стандартизация модели и создание открытой экосистемы дескрипторов и правил снизит порог входа для новых пользователей.

Предложенная модель представляет целостный подход к проблеме интеграции разнородных интерфейсов, основанный на принципах абстракции, декларативности и типобезопасности. Реализация на языке C++ обеспечивает баланс между производительностью и выразительностью, делая модель применимой для задач реального времени. Модель способствует созданию гибких, масштабируемых и надежных систем интеграции, снижая сложность и стоимость разработки в различных отраслях – от промышленной автоматизации до интернета вещей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Страуструп, Б. Язык программирования C++. Специальное издание / Б. Страуструп; пер. с англ. – Москва: Бином-Пресс, 2011. – 1136 с.
2. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссидес; пер. с англ. – Санкт-Петербург: Питер, 2007. – 366 с.
3. Парнас, Д.Л. О критериях разбиения системы на модули / Д.Л. Парнас // Программирование. – 2012. – № 5. – С. 51–61. – (Пер. статьи 1972 г.).
4. Буч, Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++ / Г. Буч; пер. с англ. – 2-е изд. – Москва: Вильямс, 2008. – 720 с.
5. Шнепс-Шнеппе, М.А. Телекоммуникационные системы и сети: В 3 т. Т. 3. Мультисервисные сети / М.А. Шнепс-Шнеппе, В.А. Семенов. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 221 с.
6. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл; пер. с англ. – 5-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2012. – 960 с.
7. Карпов, Ю.Г. Теория и практика языков программирования: учебник для вузов / Ю.Г. Карпов. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2017. – 656 с.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРИЛОЖЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ВСТРАИВАЕМОЙ ПЛАТФОРМЫ ESP32

Туляков В.В.^{1,2✉}, аспирант, ведущий инженер, Степанов Д.В.¹, к.т.н., доцент

¹ Астраханский государственный технический университет,

г. Астрахань, Российская Федерация

² Филиал ПАО «Россети Юг» – «Астраханьэнерго»

E-mail: vtulyakov84@yandex.ru

Представлены результаты реализации программной модели приложения для преобразователя интерфейсов, предназначенного для интеграции в системы коммерческого учета электроэнергии. Целью работы является создание автономного устройства на базе встраиваемой платформы ESP32-S3-WROOM-1, способного выполнять роль промежуточного звена между информационно-вычислительным комплексом (ИБК) организации сетевого оператора и удаленными приборами учета электроэнергии (ПУ) потребителей. Предлагаемое устройство обеспечивает двустороннее преобразование протоколов: из формата, используемого технологическим программным обеспечением в формат Bluetooth Low Energy (BLE) для связи с ПУ, и обратно. В статье детально рассматриваются архитектурные решения, включая объектно-ориентированную модель системы, модули управления транспортом данных, ядро обработки и журналирования операций. Разработка направлена на повышение надежности сбора данных в условиях помех в линиях PLC (Power Line Communication) и предоставление гибкого инструмента для локальной диагностики ПУ силами инженерного персонала.

Ключевые слова: встраиваемые системы, ESP32, Bluetooth Low Energy (BLE), преобразователь интерфейсов, коммерческий учет электроэнергии

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION MODEL FOR AN INTERFACE CONVERTER FOR AN ELECTRICITY COMMERCIAL METERING SYSTEM BASED ON THE EMBEDDED ESP32 PLATFORM

Tulyakov V.V.^{1,2✉}, PhD student, lead engineer,

Stepanov D.V.¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

² Branch of PJSC "Rosseti Yug" – "Astrakhanenergo"

E-mail: vtulyakov84@yandex.ru

The article presents the results of implementing a software model of an application for an interface converter intended for integration into electricity commercial metering systems. The aim of the work is to create a standalone device based on the embedded esp32-s3-wroom-1 platform, capable of serving as an intermediate link between the information and computing complex (ICC) of a grid operator's organization and remote electricity meters (EMS) of consumers. The proposed device provides bidirectional protocol conversion: from the format used by the technological software to the bluetooth low energy (BLE) format for communication with EMS, and vice versa. The article details the architectural solutions, including the object-oriented system model, data transport management modules, processing and operation logging core. The development aims to improve the reliability of data collection in the presence of interference in plc (power line communication) lines and to provide a flexible tool for local diagnostics of EMS by engineering personnel.

Keywords: embedded systems, esp32, bluetooth low energy (BLE), interface converter, electricity commercial metering

Современные системы коммерческого учета электроэнергии требуют надежных и гибких каналов связи с удаленными приборами учета. Традиционно для этого используется технология PLC, однако ее эффективность может снижаться из-за электромагнитных помех,

создаваемых бытовым и промышленным оборудованием потребителей. Альтернативным каналом связи, предусмотренным в современных ПУ сплит-исполнения, является интерфейс Bluetooth Low Energy (BLE). Однако прямое взаимодействие ИБК сетевой компании с ПУ по BLE часто невозможно из-за архитектурных ограничений и требований безопасности.

Для решения данной проблемы была инициирована разработка специализированного преобразователя интерфейсов. Основными задачами устройства являются: обеспечение моста между последовательным интерфейсом (UART), к которому подключается GPRS-модем или ноутбук оператора, и беспроводным BLE-интерфейсом ПУ; преобразование протоколов обмена данными и маршрутизация запросов на основе таблицы маршрутов.

Устройство реализуется на базе микроконтроллера ESP32-S3, сочетающего низкую стоимость, поддержку BLE 5.x [1–2] и достаточные вычислительные ресурсы.

Предлагаемая статья фокусируется на методологических и архитектурных аспектах разработки программной модели приложения для данного преобразователя. Изложение ведется в контексте практической инженерной задачи с акцентом на выбор технологий, проектирование объектной модели и организацию кодовой базы.

Разработанное устройство позиционируется как универсальный коммуникационный шлюз. В автономном режиме, будучи подключенным к GPRS-модему, оно обеспечивает для ИБК доступ к ПУ по BLE, выступая прозрачным преобразователем протоколов. В локальном режиме при подключении к ноутбуку инженера через USB-UART устройство позволяет напрямую взаимодействовать с ПУ для диагностики и настройки.

Для формализации требований к обработке данных используется семиуровневая модель OSI [3]. Фактическая реализация устройства концентрируется на уровнях Приложения, Представления (преобразование форматов), Транспорта (обеспечение доставки данных через UART и BLE) и Физическом (аппаратные порты). Канальный и Сетевой уровни абстрагируются путем использования готовых стеков протоколов (NimBLE [5] для BLE, HardwareSerial для UART). Такой подход позволил сфокусироваться на бизнес-логике приложения.

Архитектура программного обеспечения преобразователя построена на принципах объектно-ориентированного программирования [7] (ООП), что обеспечивает модульность, удобство сопровождения и потенциальное повторное использование компонентов.

Система декомпозирована на следующие ключевые абстракции, представляющие собой объектную модель:

Ядро (Kernel) – центральный управляющий компонент, ответственный за координацию работы всех модулей. Ядро инкапсулирует буферы приема (`buffer_rx`) и передачи (`buffer_tx`) данных фиксированного размера, обеспечивает их синхронизацию и предоставляет интерфейсы для доступа к ним другим модулям через структуру `BufferPointer_t`. Оно также управляет жизненным циклом объектов транспорта.

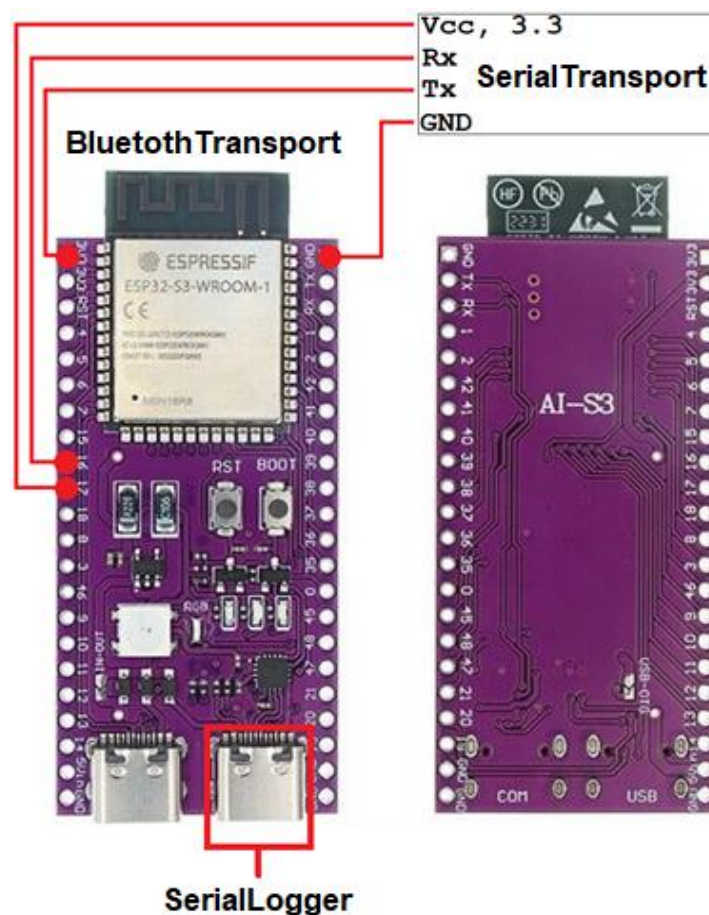
Транспорт (Transport) – абстракция канала связи, реализованная через интерфейс `ITransport`, что позволяет единообразно работать с различными физическими интерфейсами. В системе определены два конкретных класса: `SerialTransport` (для взаимодействия через UART с ИБК или ноутбуком) и `BluetoothTransport` (для связи с ПУ по BLE с использованием библиотеки NimBLE). Ядро регистрирует экземпляры этих классов и маршрутизирует данные между ними.

Журналирование (Logging) – представляет собой подсистему диагностики и отладки. Интерфейс `ILogger` определяет контракт для вывода сообщений. Класс `SerialLogger` реализует вывод логов на выделенный UART-порт (например, для отладки через монитор последовательного порта IDE). Логирование интегрировано во все критические компоненты системы для отслеживания состояния и анализа ошибок.

Файл ресурсов (`R.hpp`) – глобальный заголовочный файл, централизующий ключевые константы, определения типов данных (например, `TransportType_t`, `KernelBufferType_t`), параметры конфигурации портов (скорости, пины) и размеры буферов. Такой подход упрощает конфигурацию системы и обеспечивает согласованность настроек во всех модулях.

Взаимодействие между компонентами системы происходит по следующей схеме (см. рисунок, таблицу):

1. В точке входа программы (main.cpp) создаются экземпляры всех основных объектов: Kernel, SerialLogger, SerialTransport, BluetoothTransport.
2. Ссылка на логгер передается в ядро и другие компоненты через метод `set_logger()`.
3. Объекты транспорта регистрируются в ядре с помощью метода `set_transport()`, принимающего тип транспорта (`TRANSPORT_TYPE_SERIAL`, `TRANSPORT_TYPE_BLUETOOTH`) и указатель на объект.
4. В основном цикле программы (`loop()`) ядро опрашивает зарегистрированные транспорты на наличие входящих данных. При получении данных от SerialTransport (запрос от ИБК) ядро помещает их в `buffer_rx`, инициирует их обработку (парсинг, преобразование протокола) и передает результат для отправки через BluetoothTransport. Ответ от ПУ проходит обратный путь.



Внешний вид платы разработки ESP32-WROOM-1,
с указанием аппаратных интерфейсов

Логика обработки данных реализуется в отдельном модуле, ответственном за парсинг входящих запросов. Запрос от ИБК в формате IEC содержит идентификатор (MAC-адрес) целевого ПУ. На основе этого идентификатора устройство обращается к внутренней таблице маршрутизации, хранящей соответствие MAC-адресов и паролей для BLE-соединения. После успешного подключения к ПУ (роль BLE-клиента) устройство преобразует запрос в формат, понимаемый характеристиками GATT-сервисов ПУ, и отправляет его.

Полученный ответ конвертируется обратно в IEC-формат и передается на последовательный порт. Вся последовательность действий (от запроса на подключение «/MAC!..» в формате IEC-61107 [6] до команды отключения «.B0..») управляется конечным автоматом, реализованным в ядре системы.

Схема работы объектов транспорта SerialTransport и SerialLogger

	Уровень абстракции	Использование порта SerialTransport для подключения пульта оператора	Использование порта SerialLogger для прошивки и журналирования
Использование портов в коде программы	4	SERIAL_TRANSPORT	SERIAL_LOGGER
Подключение к портам в коде программы изделия	3	Serial1.begin(115200, SERIAL_8N1, 16, 17);	Serial0.begin(115200, SERIAL_8N1, 44, 43);
Имя объекта для кода программы	2	Serial1	Serial0
Библиотека «Hardware Serial.hpp»		Библиотечные низкоуровневые методы для работы с чипом последовательной передачи на плате разработки	
Распиновка плата разработки ESP32-S3-WROOM-1	1	о о о о Vcc Gnd RxPin TxPin 16 17	о о RxPin TxPin 44 43

Программная часть проекта разрабатывается в среде PlatformIO [4], интегрированной в редактор Visual Studio Code. Такой выбор обеспечивает удобную работу с проектами для встраиваемых систем, управление зависимостями и поддержку отладки. Код пишется на языке C++ с использованием стиля, близкого к Arduino, что упрощает начальное освоение и работу с периферией микроконтроллера.

Для реализации BLE-функциональности выбрана библиотека NimBLE как более легковесная и производительная альтернатива стандартному стеку BLEDevice Arduino для ESP32. Она предоставляет полный контроль над процессом подключения, сканирования и обмена данными по GATT.

Аппаратной основой служит плата ESP32-S3-WROOM-1, обладающая двумя аппаратными UART-портами (используются для взаимодействия с внешним миром и для отладки) и встроенным модулем Bluetooth 5.0. Файловая структура проекта организована по логическим модулям: system/ (ядро), transport/, logger/, resources/. Каждый класс, как правило, разделен на заголовочный файл (.hpp) с объявлением и файл реализации (.cpp), что соответствует принципам модульной компиляции в C++.

В статье представлена комплексная модель программного обеспечения для преобразователя интерфейсов, предназначенного для интеграции в системы дистанционного сбора данных с приборов учета электроэнергии. Предложенная архитектура, основанная на четком разделении ответственности между объектами Ядра, Транспорта и Журналирования, демонстрирует гибкий и масштабируемый подход к разработке встраиваемых систем. Использование объектно-ориентированной парадигмы и абстракций повышает читаемость и сопровождаемость кода, что критически важно для промышленных решений.

Ключевыми преимуществами разрабатываемого решения являются его универсальность (работа как в составе АСКУЭ, так и в качестве портативного диагностического инструмента), потенциальная низкая себестоимость на базе массовых компонентов и независимость от помех в PLC-канале. Реализация коммуникационной модели с использованием современного стека NimBLE обеспечивает надежное взаимодействие с широким спектром ПУ, поддерживающих BLE-интерфейс. Дальнейшая работа будет сосредоточена на завершении реализации всех модулей, углубленном тестировании в реальных условиях энергосетевого предприятия, а также на разработке механизмов безопасного хранения и обновления таблицы маршрутизации.

Представленные наработки могут быть полезны для инженеров и разработчиков, занимающихся созданием аналогичных шлюзовых устройств для Интернета Вещей (IoT) в энергетике и смежных отраслях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Espressif Systems. ESP32-S3 Series Datasheet [Electronic resource]. – 2022. – URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf (дата обращения: 26.01.2026).
2. Bluetooth SIG. Bluetooth Core Specification Version 5.3 [Electronic resource]. – 2021. – URL: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-3/> (дата обращения: 26.01.2026).
3. Zimmermann, H. OSI Reference Model – The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection / H. Zimmermann // IEEE Transactions on Communications. – 1980. – Vol. 28. – No. 4. – Pp. 425–432.
4. PlatformIO. Professional collaborative platform for embedded development [Electronic resource]. – URL: <https://platformio.org/> (дата обращения: 26.01.2026).
5. NimBLE Arduino Library [Electronic resource]. – URL: <https://github.com/h2zero/NimBLE-Arduino> (дата обращения: 26.01.2026).
6. Международная электротехническая комиссия (МЭК). IEC 61107: Data exchange for meter reading, tariff and load control – Direct local data exchange. – 1996.
7. Object-Oriented Analysis and Design with Applications / G. Booch [et al.]. – 3rd ed. – Addison-Wesley, 2007.

РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ ПРЕДМЕТА ИНТЕРЬЕРА

Услин Д.А. , магистрант, Родионов В.А., старший преподаватель

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: uslin.denis@bk.ru

Представлена разработка предмета интерьера – декоративная полка. Определены назначение и эстетические характеристики данного изделия. Выбраны материал и метод изготовления.

Ключевые слова: интерьер, предмет интерьера, декоративная полка, 3D-модель, 3D-моделирование, фрезерный станок

DEVELOPMENT OF A 3D MODEL OF AN INTERIOR ITEM

Uslin D.A. , Master's Degree student, Rodionov V.A., senior lecturer

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: uslin.denis@bk.ru

A design for a decorative shelf is presented. The purpose and aesthetic characteristics of this piece are defined. The material and manufacturing method are selected.

Keywords: interior, interior item, decorative shelf, 3D model, 3D modeling, milling machine

Декоративная полка в современном интерьере – это стильный и функциональный элемент, который служит для оформления пространства и размещения предметов: книг, учебников, фигурок и много другого. На современном рынке представлено большое количество полок различных размеров, функциональности, ценового сегмента и эстетики [1]. Изготовлены они из самых разных материалов: дерева, металла, стекла, а также их комбинаций. В связи с этим в данной сфере не хватает кастомизации и инноваций, свежих идей и решений.

Целью работы являлись разработка, проектирование и изготовление предмета интерьера – декоративной полки. Был проведен анализ рынка и разработана концепция изделия, соединяющая функциональность и эстетические качества. Был выбран стиль «минимализм с элементами классики», этот стиль сегодня наиболее востребован и актуален. Данный подход сочетает чистоту и простоту форм, характерных для минимализма, с изящностью и утонченностью классических деталей. Указанный стиль идеально подходит для тех, кто ценит гармонию и элегантность. Такая полка сочетает природные материалы, декоративные элементы, технологичность и функциональность. Материал – мебельный щит из дуба. Он был выбран, так как дуб имеет высокую прочность и долговечность, устойчив к износу, а также дуб хорошо поддается фрезеровке, но он склонен к сколам при неправильных режимах резания.

Главным акцентом оформления стала светодиодная лента. Она создает приятное равномерное свечение, которое эффектно подчеркивает дизайн и делает акцент на ключевых предметах. К преимуществам решения относятся возможность подобрать нужный цвет и настроить яркость, низкое энергопотребление и впечатляющий срок службы светодиодов.

Процесс проектирования был полностью реализован в среде параметрического моделирования Blender [2], что позволило создать комплексную 3D-модель с возможностью рендеринга и текстурирования (рис. 1).

Это полностью бесплатная программа с открытым исходным кодом и мощным функционалом, что делает ее доступной для всех пользователей. Поддерживает различные форматы экспорта в другие программы для дальнейшей обработки на фрезерном станке.

Габаритные размеры данной полки: ширина 20 см, высота 50 см, длина 100 см. Параметр ширины можно персонализировать для индивидуальной подгонки под пространство и потребности заказчика, так же как и декоративные вырезы: одни люди ценят их (рис. 2), а другие предпочитают от них отказаться (рис. 3).

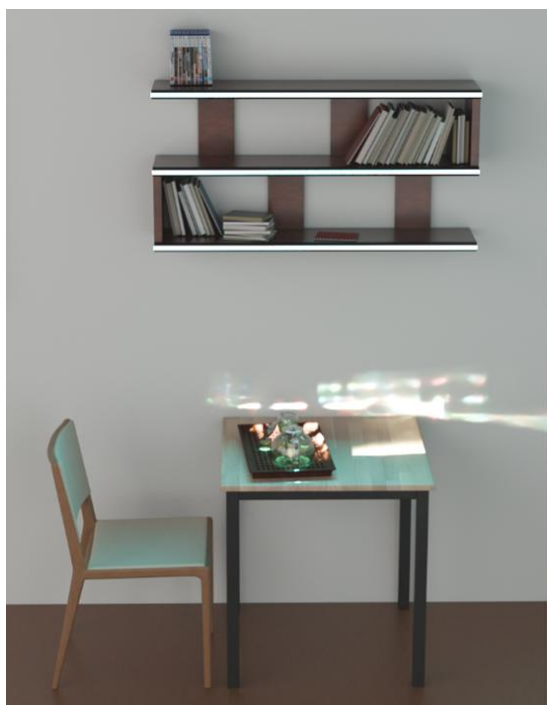


Рис. 1. Концептуальная модель декоративной полки



Рис. 2. Модель полки с декоративными вырезами

Изготавливается данное изделие на фрезерном станке с ЧПУ. Фрезерный станок обеспечивает точное позиционирование инструмента, что дает возможность создавать элементы с высокой точностью; также фрезер позволяет делать различные декоративные и функциональные вырезы [3, 4, 5]. По сравнению с ручной обработкой фрезерование значительно сокращает время изготовления за счет высокой скорости работы оборудования.



Рис. 3. Модель полки без декоративных вырезов

Таким образом, был разработан предмет интерьера – декоративная полка, выбраны стиль и материал изделия [6]. Данное изделие сочетает в себе эстетичность и функциональность, благодаря чему оно подойдет к разным интерьерным стилям и станет удачным дополнением любого пространства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Киселева, М.И. Разработка 3D-модели универсального календаря / М.И. Киселева // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2025. – С. 133–136.
2. Blender-3D [Электронный ресурс]. – URL: <https://media.contented.ru/glossary/blender-3d/>
3. Родионов, В.А. Моделирование рельефной матрицы для получения оттиска на тонколистовом материале в программе SolidWorks / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2018. – С. 112–115.
4. Родионов, В.А. Моделирование обработки матрицы для получения рельефного оттиска на тонколистовом материале / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Молодежная наука: вызовы и перспективы: матер. II Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Сызрань, 2019. – С. 128–130.
5. Андреева, Е.А. Художественная работа по дереву / Е.А. Андреева. – Москва: Рипол Классик, 2007. – 384 с.
6. Абрамова, О.К. Разработка 3D-модели изделия «органайзер для украшений» / О.К. Абрамова, В.А. Родионов // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2023. – С. 3–5.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

Чеканов В.С.^{1✉}, аспирант, **Назаров Д.В.**^{1,2}, к.т.н., доцент

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,

г. Самара, Российская Федерация

E-mail: chekanovv2001@mail.ru

Частота собственных колебаний (ЧСК) лопаток компрессора газоперекачивающего агрегата является важным параметром, несоответствие которого норме ведет к усталостным разрушениям. Существующая практика браковки всего комплекта лопаток увеличивает стоимость и длительность ремонта. В статье представлена методика оперативного измерения ЧСК с помощью акселерометра и проанализированы доступные способы стабилизации ЧСК путем изменения геометрии (наплавка, шлифование), применимые персоналом без высокой квалификации. Определены эффективные зоны воздействия. Для получения точных корректировочных зависимостей отмечена необходимость дальнейших исследований.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, рабочие лопатки компрессора, стабилизация частоты собственных колебаний, модификация геометрии лопатки

ON STABILIZING THE FREQUENCY PARAMETERS OF THE COMPRESSOR'S WORKING BLADES

Chekanov V.S.^{1✉}, PhD student, **Nazarov D.V.**^{1,2}, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

² Samara Federal Research Center RAS, Samara, Russian Federation

E-mail: chekanovv2001@mail.ru

The natural oscillation frequency (NOF) of the compressor blades of a gas pumping unit is an important parameter, the discrepancy of which leads to fatigue failure. The current practice of rejecting the entire set of blades increases the cost and duration of repairs. The article presents a technique for the operational measurement of the NOF using an accelerometer and analyzes the available ways to stabilize the NOF by changing the geometry (surfacing, sawing), applicable by personnel without high qualifications. Effective impact zones have been identified. In order to obtain accurate correction dependencies, the need for further research was noted.

Keywords: gas pumping unit, compressor blades, stabilization of natural vibration frequency, modification of blade geometry

Обеспечение допустимых значений частоты собственных колебаний (ЧСК) рабочих лопаток осевых компрессоров является ключевым условием их надежной эксплуатации. Это обусловлено тем, что одной из наиболее вероятных причин возникновения усталостных трещин и последующего разрушения лопаток в эксплуатации является значительный уровень переменных напряжений, вызываемый резонансными колебаниями [1]. Резонансные явления, возникающие при совпадении собственных частот с вынужденным периодическим воздействием на систему, приводят к резкому росту амплитуды колебаний и общего уровня вибрации [2]. Наиболее опасными являются низкочастотные формы колебаний, характеризующиеся наибольшими амплитудами и вибронапряжением. Именно поэтому при восстановлении компрессоров обязательной процедурой является вибрационный контроль ЧСК лопаток по ступеням.

Проблема обеспечения требуемых значений ЧСК особенно актуальна для газотранспортной отрасли. Ресурс значительной части современного парка газоперекачивающих агре-

гатов (ГПА) превышает установленные заводом-изготовителем значения. Длительная эксплуатация приводит к возникновению на лопатках сколов, забоин, эрозионного износа и других изменений геометрии, которые приводят к изменению ЧСК. Ярким примером являются компрессоры ГПА типа ГТК-10-4, которые несмотря на высокие значения наработки остаются одними из самых массовых в эксплуатации.

В соответствии с действующими нормами ЧСК рабочих лопаток с первой по десятую (для агрегата ГТК-10-4) ступень осевого компрессора сравниваются с регламентным диапазоном частот лопаток, приведенным в таблице.

Нормативные интервалы ЧСК для рабочих лопаток осевого компрессора газотурбинного двигателя ГТК-10-4

Номер ступени	Основной тон изгибных колебаний, Гц	Допустимый разброс частот в комплекте, %	Допустимое отклонение по частоте для лопаток, имеющих эрозионный износ, Гц
1	254±4	4,0	меньше на 10
2	247,5±7,5	4,0	меньше на 5
3	251,5±6,5	4,0	245–258
4	334±13	6,0	321–347
5	465±15	6,0	любое выше
6	472,5±17,5	6,0	любое выше
7	582,5±22,5	6,0	любое выше
8	565±25	8,0	любое выше
9	592,5±27,5	8,0	любое выше
10	680±25	8,0	любое выше

Стоит отметить, что при несоответствии ЧСК отдельной лопатки техническим требованиям из-за конструктивных особенностей замковой части рабочего колеса существенной части стационарных роторов турбокомпрессора невозможна замена одной недопустимой по частоте лопатки, так как требуется демонтаж всех рабочих лопаток ступени, следующих от замка рабочего колеса до нее.

На действующих ремонтных предприятиях ввиду отсутствия данных о возможности эффективного перевода ЧСК из недопустимых значений в допустимые прибегают к полной замене комплекта лопаток. Периодически из-за несоответствия ЧСК техническим требованиям выбраковываются рабочие лопатки с неотработанным ресурсом, что увеличивает материальные затраты и время нахождения агрегата в ремонте. Поэтому необходимо рассмотреть методы контроля и изменения ЧСК для проведения дальнейших научных исследований по изучению количественных характеристик ЧСК и закономерностей их изменения.

Существует по меньшей мере три основных метода определения ЧСК лопаток: акустический метод, метод определения собственных частот с помощью акселерометра и определения собственных частот методом конечных элементов (МКЭ) [3]. Данные методы позволяют оценить спектры, формы и количественные характеристики частоты. Однако стоит отметить, что метод МКЭ не позволяет учитывать скрытые дефекты материала лопаток, а акустический метод требует значительных материальных затрат для достижения результата. Примеры, демонстрирующие возможности методов для различных объектов, представлены в работах [4–6].

Вибрационный контроль, пример которого продемонстрирован в работе [7], в нашем случае основан на ударном возбуждении колебаний и последующей регистрации изменения частот первой изгибной формы при помощи виброанализатора с акселерометром.

Для снятия характеристик используется универсальное замковое устройство, представленное на рис. 1, которое обеспечивает стабильность фиксации замковой части лопаток всех типов и воссоздает значения натяга установленной в компрессоре лопатки.

Лопатка 1 с установленным на ней датчиком виброанализатора 2 вставляется между подвижными фиксирующими элементами 3, которые помещаются в гидравлическое приспособление 4. Для контроля ЧСК по первой изгибной форме (основному тону) датчик устанавливается в зоне корневого сечения для получения более точных результатов.

Фиксация лопаток происходит за счет движения поршня 5 под действием рабочей жидкости. При снятии давления пружина 6 возвращает поршень его в стартовое положение. Давление жидкости создается с помощью специального пресса. Вентиль 7 служит для подачи в пресс масла. Вентиль 8 перекрывает магистраль между гидравлическим приспособлением и прессом. Давление регулируется рукояткой 9 поршня пресса с винтовым механизмом. Контроль давления осуществляется с помощью манометра 10.

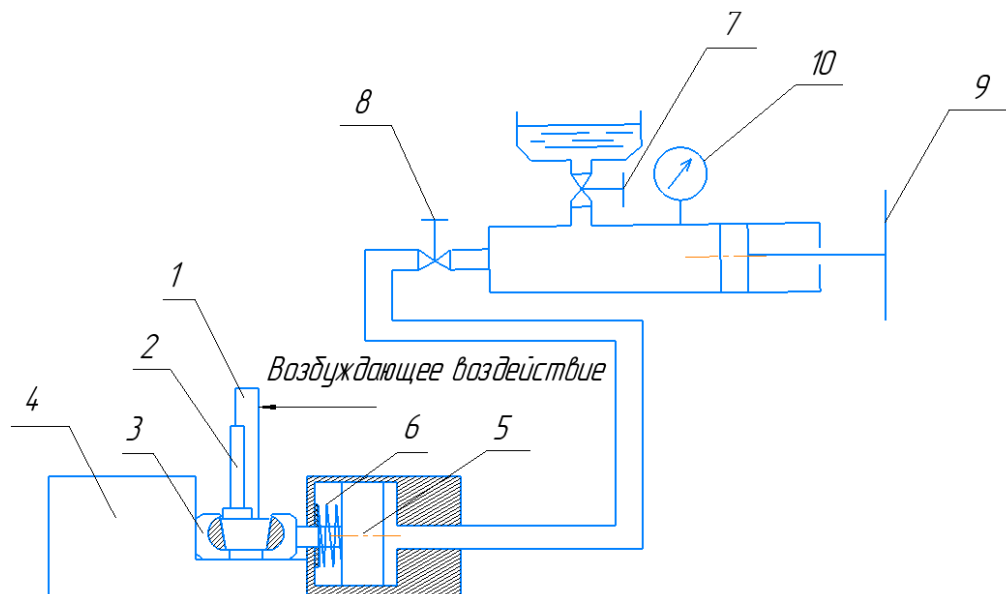


Рис. 1. Схема универсального замкового устройства для фиксации рабочих лопаток:

- 1 – рабочая лопатка компрессора; 2 – датчик виброанализатора (акселерометр);
- 3 – подвижный фиксирующий элемент; 4 – гидравлическое приспособление; 5 – поршень;
- 6 – пружина; 7 – вентиль подачи масла; 8 – перекрывной вентиль;
- 9 – рукоятка поршня пресса; 10 – манометр

После обработки полученного сигнала виброанализатор определяет значение ЧСК по первой изгибной форме, которое сравнивается с техническими требованиями. При несоответствии возникает необходимость стабилизации ЧСК посредством изменения ее количественных характеристик. Наиболее эффективным методом для этого является изменение геометрических параметров лопатки.

Согласно работе [8], изменение хорды лопатки практически не влияет на ЧСК, в то время как увеличение осевой длины пера в значительной степени уменьшает частоту. К увеличению ЧСК также приводят увеличение максимальной толщины пера и максимального подъема средней линии.

При различном изменении геометрии по профилю пера лопатки жесткость определяется участками вблизи узловых линий или мест закрепления, а инерционные свойства – участками с большими перемещениями. Например, при уменьшении толщины лопатки в корневом сечении уменьшится ее жесткость и снизится частота первой изгибной формы. При уменьшении толщины лопатки на периферии уменьшаются ее инерционные свойства, а частота первой изгибной формы увеличится. При спиле уголка на выходной кромке уменьшаются инерционные свойства периферии, что вызовет увеличение частоты первой изгибной формы.

Исходя из этого определим основные потенциально эффективные зоны и методы для изменения геометрии с учетом возможности применения на предприятиях, не требующих высокой квалификации персонала и затрат на специальное оборудование. Соответствующие зоны и способы представлены на рис. 2, 3.

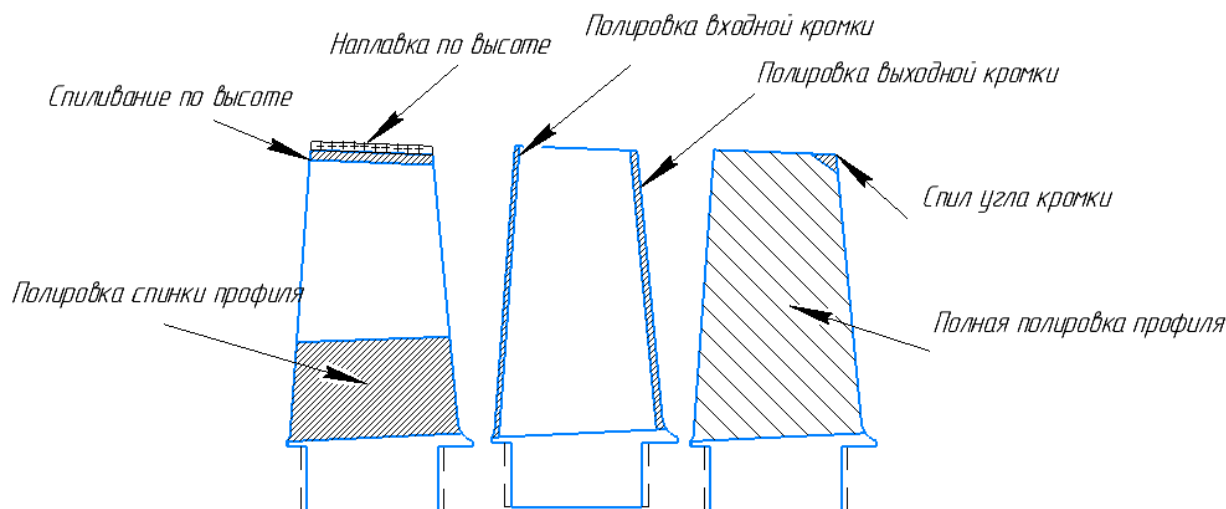


Рис. 2. Зоны изменения геометрии профиля рабочих лопаток

Таким образом, на примере рабочих лопаток компрессора ГТК-10-4 рекомендуется:

1. Для увеличения частоты лопаток:

- выполнение отверстий на 1–4 ступенях диаметром до 4 мм и глубиной до 15 мм (метод влияет на жесткость сечения верхней части профиля и зависит от массы удаленного металла);
- равномерный спил по высоте;
- полировка входной и выходной кромок;
- спил уголка на выходной кромке.

2. Для уменьшения частоты лопаток:

- полировка нижней трети спинки профиля;
- наплавка металла по высоте пера.

Полученные в ходе работы результаты позволили определить наиболее эффективный метод измерения ЧСК и выявить способы стабилизации ЧСК за счет изменения профиля лопатки.

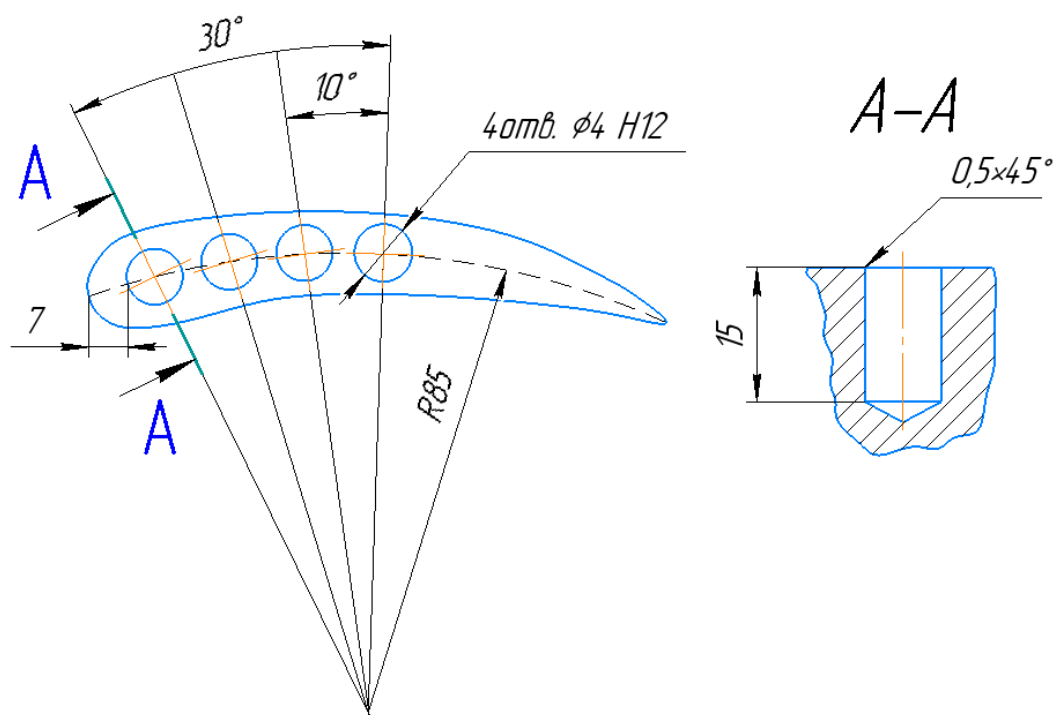


Рис. 3. Схема расположения отверстий в торцевой части (для лопаток 1–4 ступени на примере ГТК-10-4)

Для получения точных количественных характеристик, вывода закономерностей и создания устойчивых моделей ЧСК необходимо провести дополнительные исследования с использованием значительно большего объема данных по каждому из описанных в работе методов. Это позволит не только улучшить существующие способы стабилизации ЧСК, но и расширить их применение на ремонтных предприятиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (Госзадания) FMRW-2025-0052.

The work was carried out with the framework of the government order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FMRW-2025-0052).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванченко, И.П. Опыт борьбы с трещинообразованием лопастей радиально-осевых гидротурбин / И.П. Иванченко, А.Н. Прокопенко // Гидротехника. – 2022. – № 3. – С. 34–45. – DOI: 10.55326/22278400_2022_3_34.
2. Смирнов, А.С. История механического резонанса – от первоначальных исследований до авто-резонанса / А.С. Смирнов, Б.А. Смольников // Чебышевский сборник. – 2022. – Т. 23. – № 1. – С. 269–292. – DOI: 10.22405/2226-8383-2022-23-1-269-292.
3. Spodniak, M. Turbine Blade Natural Frequency Estimation Using Various Methods and their Comparisons / M. Spodniak, J. Novotňák, F. Heško // Acta Polytechnica Hungarica. – 2021. – Vol. 18. – No. 10. – Pp. 135–149. – DOI: 10.12700/APH.18.10.2021.10.7.
4. Ермаков, В.Ю. Экспериментально-математическое моделирование длинномерной конструкции на основе результатов частотных испытаний / В.Ю. Ермаков // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т. 29. – № 3. – С. 29–40. – DOI: 10.34759/vst-2022-3-29-40.
5. Kirsanov, M. Model of a hexagonal prismatic truss. Oscillation frequency spectrum / M. Kirsanov // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2023. – № 1 (106). – DOI: 10.4123/CUBS.109.6.
6. Определение частот и форм собственных крутильных колебаний многомассовой системы самоходного шасси тягового класса 0,6 / С.Е. Сенкевич, З.А. Годжаев, Е.Н. Ильченко [и др.] // Известия НВ АУК. – 2024. – № 4 (76). – С. 387–419. – DOI: 10.32786/2071-9485-2024-04-44.
7. Степаненко, Н.Ю. Метод собственных колебаний для первичной диагностики качества лопаток ГТД / Н.Ю. Степаненко, В.В. Астанин, В.В. Лукьянов // Молодежный вестник УГАТУ. – 2023. – № 3 (29). – С. 138–144.
8. Уланов, А.Ю. Расчет прочности авиационных двигателей: электрон. учеб. пособие / А.М. Уланов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – Электрон. и граф. дан. (8,91 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

РАЗРАБОТКА ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СРЕДСТВ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Штопина Ю.А. , студент, Воронин В.Н., старший преподаватель

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: juli.shtopina@gmail.com

Представлены результаты разработки геометрических моделей формообразующих элементов для горячей объемной штамповки деталей сложной геометрической формы. Описана методология проектирования, включающая в себя анализ конструкторской документации, создание геометрических моделей на основе рабочих чертежей деталей, выбор метода получения заготовок, расчет параметров заготовок, разработку геометрических моделей заготовок, анализ разработанных геометрических моделей уклонов заготовок, разработку геометрических моделей пуансона и матрицы штамповой оснастки, а также анализ процесса объемной горячей штамповки заготовок в САЕ-системе.

Ключевые слова: штамповая оснастка, горячая объемная штамповка, геометрические модели, CAD, САЕ, пресс, молот

DEVELOPMENT OF FORMING ELEMENTS OF PRODUCTION FACILITIES FOR COMPLEX SHAPED PARTS

Shtopina Yu.A. , student, Voronin V.N., senior lecturer

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: juli.shtopina@gmail.com

The article presents the results of a student project on the digital design of forming elements for hot-volume stamping of parts of complex geometric shapes. The design methodology is described, which includes the analysis of design documentation, the creation of geometric models based on working drawings of parts, the choice of a method for obtaining blanks, the calculation of billet parameters, the development of geometric models of blanks, the analysis of developed geometric models of billet slopes, the development of geometric models of stamping tooling, the analysis of the process of volumetric hot stamping of blanks in the CAE system.

Keywords: stamping tooling, hot volume stamping, geometric models, CAD, CAE, press, stamping hammer

В условиях динамичного обновления номенклатуры машиностроительной продукции, особенно в аэрокосмической и оборонной отраслях, критическое значение приобретают скорость и гибкость технологической подготовки производства (ТПП). Проектирование оснастки для изготовления деталей сложной формы традиционными методами характеризуется высокой трудоемкостью и существенной зависимостью от квалификации технолога-инструментальщика. Внедрение сквозных цифровых технологий на базе CAD/CAE-систем позволяет формализовать процесс и сократить цикл разработки. Ключевое значение имеет способность на этапе виртуального проектирования прогнозировать и минимизировать технологические риски, обеспечивая требуемое качество штампуемых заготовок.

Целью работы является разработка и апробация методики сквозного проектирования геометрических моделей формообразующих элементов штамповой оснастки для производства деталей, имеющих сложную геометрию, с использованием современных компьютерных технологий [1]. Данная методика обеспечивает соответствие геометрии окончательной заготовки заданным требованиям точности, технологичность процесса штамповки за счет оптимизации формы заготовки и параметров оснастки, а также исключение критических дефектов формообразования путем предварительного САЕ-моделирования.

Штамповая оснастка представляет собой комплекс формообразующих элементов, предназначенный для придания заготовке заданной формы и размеров при горячей штамповке. К ее ключевым компонентам относятся рабочие части (пуансон, матрица), формирующие деталь; корпусные элементы (плиты, хвостовики), обеспечивающие крепление на оборудовании; направляющие (колонки, втулки), гарантирующие точное сопряжение частей; установочно-фиксирующие элементы для позиционирования заготовки, а также съемные устройства для удаления готовой детали и отходов.

Согласно жизненному циклу изделия (ЖЦИ), процесс разработки включает стадии конструкторской и технологической подготовки производства [10]. Конструкторская подготовка заключается в разработке документации в виде геометрических моделей изделия, рабочих чертежей и спецификаций [8, 9]. Результаты работы конструктора передаются на стадию технологической подготовки, где технолог выбирает метод получения заготовки, разрабатывает ее геометрическую модель и технологический процесс последующей механической обработки. Модель заготовки передается конструктору оснастки для разработки геометрических моделей формообразующих элементов штампа (пуансона и матрицы). Предлагаемая методика предполагает использование сквозной конструкторско-технологической подготовки производства на основе геометрических моделей изделия, получаемых на каждом этапе ЖЦИ в виде твердого тела без истории построения [6].

Анализ исходных данных позволил сформировать стратегию и последовательность проектирования штамповой оснастки для горячей объемной штамповки (ГОШ). На начальном этапе проведены классификация и анализ рабочих чертежей типовых деталей, отобранных из базы данных кафедры «Технологии машиностроения, станки и инструменты» (ТМСИ) СамГТУ, со средним габаритным размером порядка 220 мм. Исходные материалы представлены сталями различных технологических групп: хорошо штампуемой конструкционной сталью 30ХГСА, коррозионно-стойкой мартенситной сталью 14Х17Н2 (ТУ 14-1-377-72), склонной к перегреву, а также высокопрочной сталью 30ХГСН2А-ВД, требующей контроля обезуглероживания при нагреве и строгого соблюдения термического цикла после деформации. Для каждой детали на основе анализа геометрии, заданных допусков на размеры и механических свойств материала определен рациональный метод штамповки – в открытом или закрытом штампе, на прессе или молоте. Данный выбор служит технологической базой для последующего расчета всех параметров процесса штамповки [7].

Следующим шагом были разработаны геометрические модели деталей по рабочим чертежам. Геометрическое моделирование деталей осуществляется методами твердотельного моделирования, результат построения приведен на (рис. 1). Далее методом прямого моделирования путем упрощения конфигурации геометрии детали и смещения граней модели на величину припуска под механическую обработку были разработаны геометрические модели поковок (заготовок). Используя методы твердотельного моделирования, на вертикальные стенки были добавлены штамповочные уклоны, а острые кромки скруглены [2]. Результат построения геометрических моделей заготовок приведен на (рис. 2).

После построения геометрии заготовки проводится обязательный технологический анализ.



Рис. 1. Разработка геометрических моделей на основе рабочих чертежей деталей



Рис. 2. Разработка геометрических моделей заготовок

Для каждой модели заготовки был проведен анализ технологичности (рис. 3), включающий проверку соответствия уклонов установленным нормам: для штамповки на молоте – 10° на внутренние и 7° на наружные поверхности; для штамповки на прессе – 7° на внутренние и 5° на наружные поверхности [3].

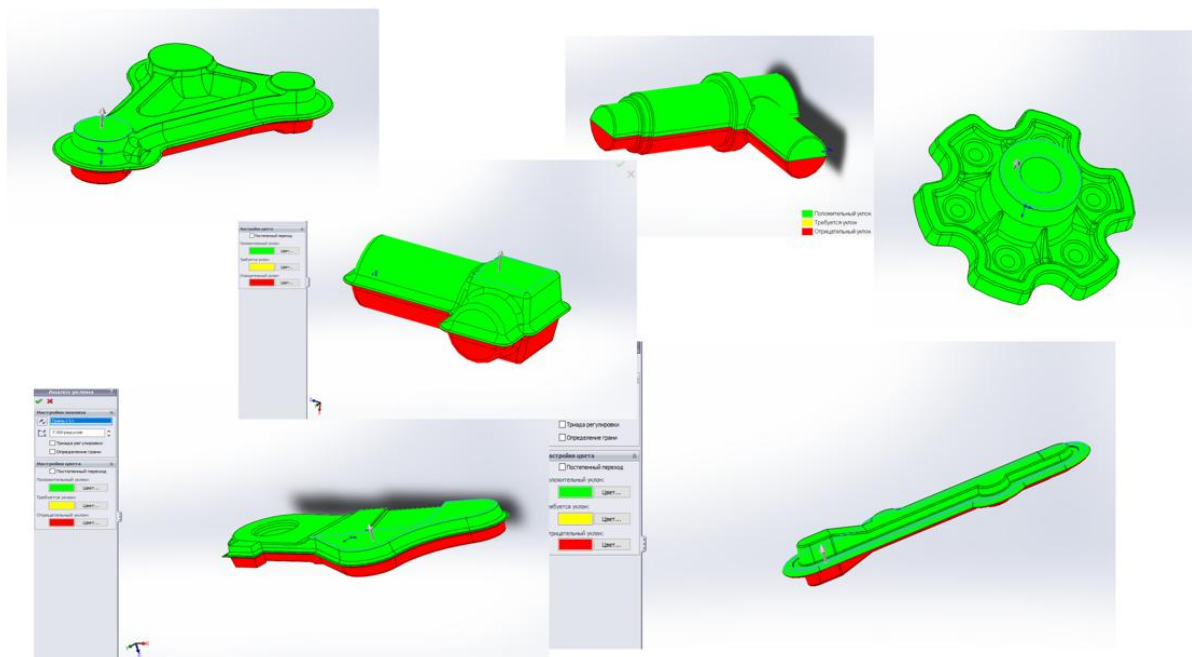


Рис. 3. Анализ разработанных геометрических моделей уклонов заготовок

На основе утвержденных моделей заготовок выполнено проектирование геометрических моделей активных элементов штамповой оснастки – пуансонов и матриц для четырех базовых схем: открытый/закрытый молот и открытый/закрытый пресс (рис. 4) [4, 5].

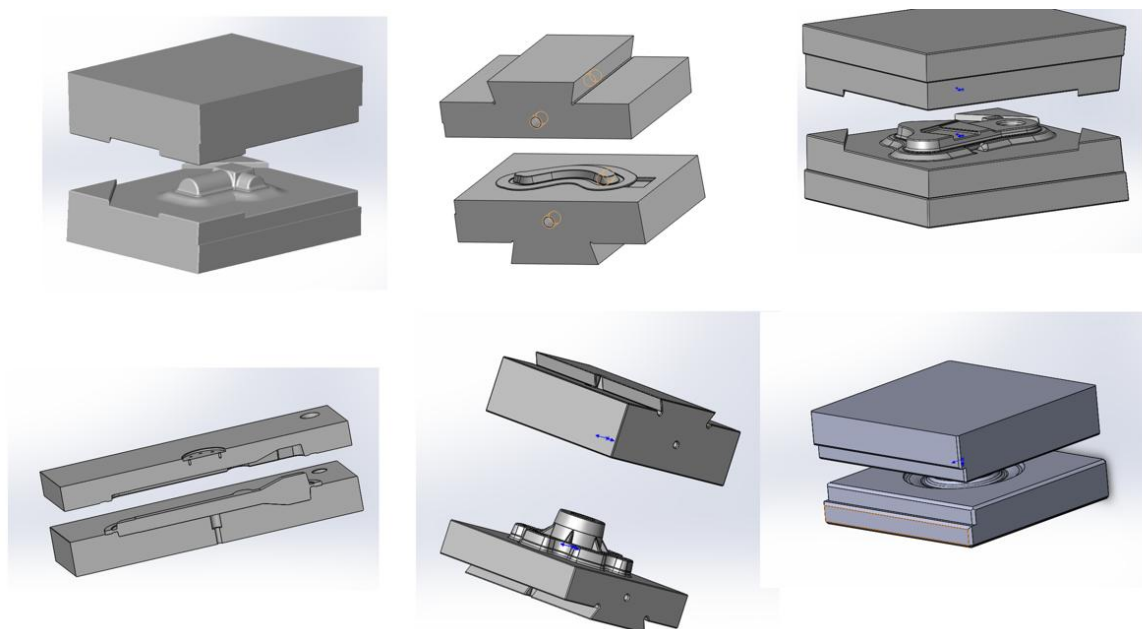


Рис. 4. Разработка геометрических моделей штамповой оснастки

Для оценки напряженно-деформированного состояния и выявления потенциальных дефектов (зажимов, недоштамповки) модели заготовок были импортированы в САЕ-систему (рис. 5) для имитации процесса штамповки. Полученные данные являются основой для следующего этапа – оптимизации.

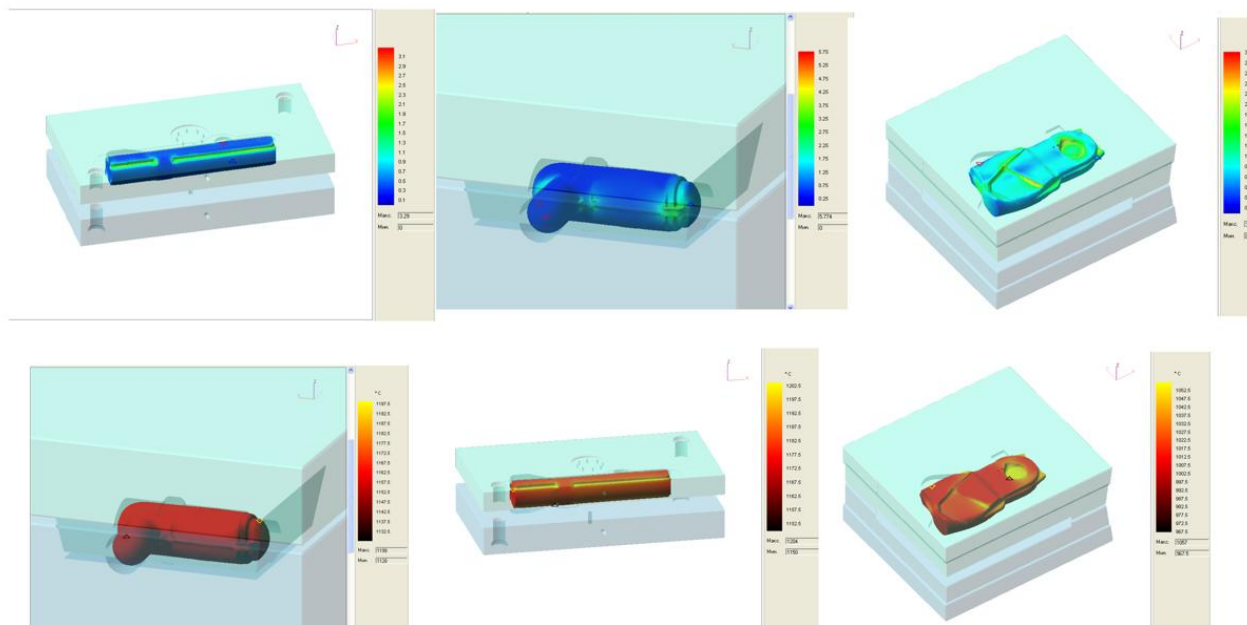


Рис. 5. Анализ процесса объемной горячей штамповки заготовок в CAE-системе

Полученные результаты демонстрируют эффективность интеграции CAD/CAE-систем для проектирования процессов горячей объемной штамповки и могут быть использованы для модернизации технологических процессов на машиностроительных предприятиях [11].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Черепашков, А.А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / А.А. Черепашков, Н.В. Носов. – Волгоград: Ин-Фолио, 2009. – 640 с.
2. Воронин, В.Н. Технологическая подготовка производства на основе CAD/CAM-систем. Часть 1 [Электронное издание] / В.Н. Воронин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2012.
3. Воронин, В.Н. Технологическая подготовка производства на основе CAD/CAM-систем. Часть 2 [Электронное издание] / В.Н. Воронин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2014.
4. Воронин, В.Н. Технологическая подготовка производства на основе CAD/CAM-систем. Часть 3 [Электронное издание] / В.Н. Воронин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2023.
5. Воронин, В.Н. Технологическая подготовка производства на основе CAD/CAM-систем. Часть 4 [Электронное издание] / В.Н. Воронин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2024.
6. Анализ рабочего чертежа, технических требований и разработка технологического чертежа по технологии машиностроения: метод. указ. к практ. занятиям, курсовому и дипломному проектированию / Сост. Н.В. Лысенко. – Куйбышев: Куйбышевск. политехн. ин-т, 1988. – 17 с.
7. Выбор технологических методов обработки поверхностей деталей: метод. руководство по практ. занятиям, курсовому и дипломному проектированию по технологии машиностроения для студентов специальности 1201 / Сост. В.А. Ахматов. – Самара: Самар. политехн. ин-т, 1991. – 12 с.
8. ГОСТ 2.053-2013. Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Общие положения. – Москва: Стандартинформ, 2019.
9. ГОСТ 2.052-2006. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения. – Москва: Стандартинформ, 2007.
10. ГОСТ Р 56862-2016. Система управления жизненным циклом. Разработка концепции изделия и технологий. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2018.
11. ГОСТ Р 15000-2016. Система разработки и постановка продукции на производство. – Москва: Стандартинформ, 2019.

РАЗРАБОТКА ДИЗАЙН-КОНЦЕПЦИИ ОРГАНАЙЗЕРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ИГРОВЫХ КУБИКОВ

Шульга Д.М. ✉, студент, Воронин В.Н., старший преподаватель

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: shulga1daria2@gmail.com

Представлены результаты разработки дизайн-концепции и трехмерной модели органайзера для хранения и транспортировки игровых кубиков. Изделие выполнено в стимпанк-стилистике и имеет форму икосаэдра. Описаны этапы выбора материалов (PETG-пластик, полиуретановая смола), методы 3D-моделирования в среде Blender, а также рассмотрены технологии производства: FDM-печать и литье в силиконовые формы. Разработанный органайзер сочетает функциональность, эргономику и современные производственные подходы.

Ключевые слова: промышленный дизайн, органайзер, кубики, 3D-моделирование, Blender, FDM-печать, стимпанк

DEVELOPMENT OF THE DESIGN CONCEPT OF THE ORGANIZER FOR CUBES FOR BOARD GAMES

Shulga D.M. ✉, student, Voronin V.N., senior lecturer

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: shulga1daria2@gmail.com

The results of the development of a design concept and a three-dimensional model of an organizer for storing and transporting game cubes are presented. The product is made in steampunk style and has the shape of an icosahedron. The stages of material selection (PETG plastic, polyurethane resin), 3D modeling methods in the Blender environment are described, and production technologies are also considered: FDM printing and casting into silicone molds. The designed organizer combines functionality, ergonomics and modern manufacturing approaches.

Keywords: industrial design, organizer, cubes, 3D modeling, Blender, FDM printing, steampunk

В современной культуре досуг все чаще перемещается в цифровое пространство, что ведет к сокращению живого общения. Настольные игры выступают важной альтернативой, развивая коммуникативные навыки и создавая общее поле для взаимодействия. Особую популярность в этой среде приобрели тактические и ролевые игры, требующие разнообразных аксессуаров, в основном игральные кости, или дайсы (d4, d6, d8, d20 и другие). Однако для их хранения и переноски предлагаются довольно примитивные решения – коробки или тканевые мешочки однотипного внешнего вида (рис. 1). Таким образом, возникла потребность в создании функционального, удобного и стилистически подходящего органайзера, который стал бы не просто утилитарным предметом, а полноценным элементом игровой культуры.



Рис. 1. Представленные на рынке способы хранения кубиков

В качестве основы для органайзера была выбрана концепция икосаэдра – той самой классической двадцатигранной кости (d20), которая является символом многих настольных ролевых игр. Такой выбор формы сразу делает изделие узнаваемым и символически насыщенным. Стилистически органайзер сочетает фэнтези с его природными мотивами (лозы, шипы, корни) и стимпанк с его механической эстетикой (шестерни, трубы, пружины) (рис. 2).



Рис. 2. Дизайн органайзера

Внутреннее пространство спроектировано таким образом, чтобы вместить три набора кубиков (рис. 3, а). Конструкция предусматривает простую сборку и разборку и имеет возможность для крепления петли или карабина (рис. 3, б) [1, 2].

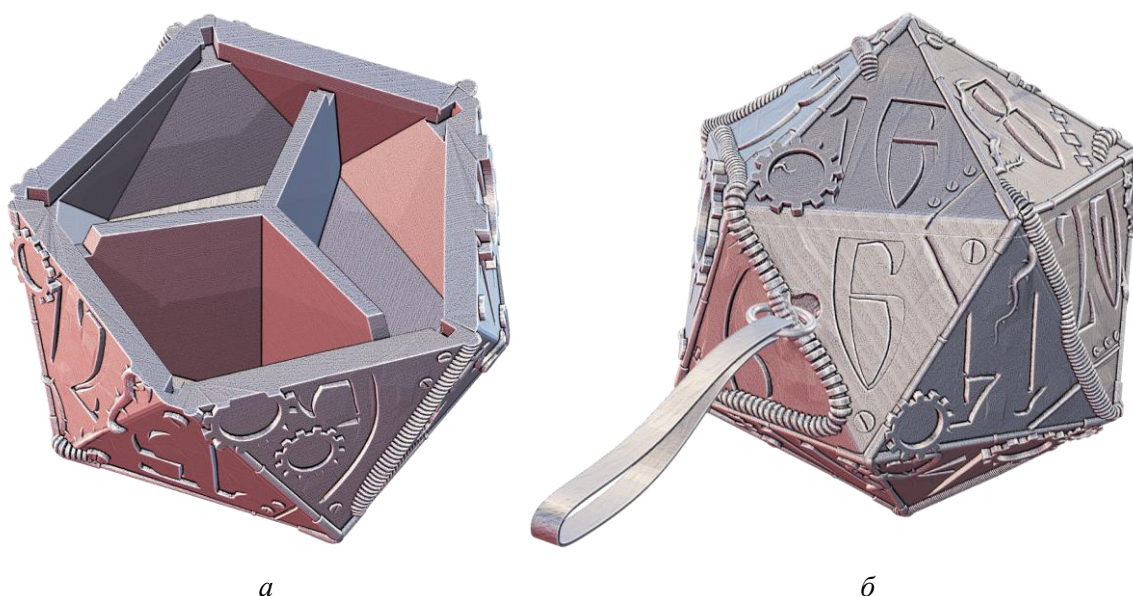


Рис. 3. Функциональное наполнение органайзера:
а – отсеки для наборов кубиков; б – крепление для переноски

Внешний рельеф, сочетающий растительные узоры и механические элементы, смоделирован в программе Blender 3D [2, 3]. Для визуализации выполнены рендеры в трех вариантах цветового решения, имитирующих благородные состаренные металлы – серебро, медь и золото, что подчеркивает игровую тематику (рис. 4, а, б, в).



Рис. 4. Цветовые решения:
а – черненное серебро; *б* – патинированная медь; *в* – состаренное золото

Для создания прототипов и единичных экземпляров оптимальна 3D-печать из PETG-пластика, обладающего необходимой прочностью, ударной вязкостью и безопасностью (рис. 5). Для потенциального мелкосерийного производства – технология литья из полиуретановой смолы в силиконовые формы [4, 5]. Этот метод обеспечивает высокую детализацию, отличные механические свойства и возможность окрашивания материала в массу, что важно для коммерческого выпуска.



Рис. 5. Прототип изделия после печати

Таким образом, предложена дизайн-концепция изделия, которое решает проблему хранения игровых кубиков. Разработанный органайзер – это не просто контейнер, а многофункциональный предмет, сочетающий в себе утилитарность, эргономику, художественную выразительность и глубокую связь с контекстом настольных игр. Он обладает конкурентным потенциалом за счет уникального дизайна и продуманной конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шкуро, А.Е. Технологии и материалы 3D-печати: учебное пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург, 2017.
2. Прахов, А.А. Самоучитель Blender 3D / А.А. Прахов. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2016. – 400 с.
3. Как подготовить модель к 3D-печати. Инструкция для дизайнера любого уровня подготовки [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.m207.ru/files/projects/pdf/Prototypster-3D-Printing-Instruction.pdf>
4. Производство изделий из полимерных материалов: учеб. пособие / В.К. Крыжановский, М.Л. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. – Санкт-Петербург: Профессия, 2004. – 464 с.
5. Изготовление точных отливок методом литья в формы из ХТС с применением силиконовой оснастки [Электронный ресурс] / А.В. Андронов, А.В. Благирев, А.О. Петрович, Ю.М. Финюгина. – Москва: Компания «Алюмлит». – URL: <https://www.alumlit.ru/assets/content/images/doc/Alumlit-tochnoe-litye.pdf>

РАЗРАБОТКА ДИЗАЙНА И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХУДОЖЕСТВЕННОГО ИЗДЕЛИЯ «КАФФ В ИСТОРИЧЕСКОЙ ТЕМАТИКЕ»

Шульга Д.М. ✉, студент, Подкругляк Л.Ю., к.т.н., доцент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: shulga1daria2@gmail.com

Представлены результаты разработки 3D-модели и технологии изготовления ювелирного изделия – каффа, выполненного в мифологической тематике. Описаны этапы выбора материала (серебро 925 пробы), методы 3D-моделирования и подготовки к литью по выплавляемым моделям. Приведены особенности обработки и финишной отделки изделия. Разработанное украшение сочетает культурную символику, эргономичность и современные производственные подходы.

Ключевые слова: ювелирное изделие, кафф, 3D-моделирование, литье по выплавляемым моделям, серебро, Кетцалькоатль, технология изготовления

DEVELOPMENT OF THE DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGY OF THE “CUFF IN HISTORICAL THEMES” ARTISTIC PRODUCT

Shulga D.M., student, Podkruglyak L.Yu., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: shulga1daria2@gmail.com

The results of the development of a 3D model and manufacturing technology of a jewelry cuff made in a mythological theme are presented. The stages of material selection (925 sterling silver), methods of 3D modeling and preparation for casting using moldable models are described. The features of the processing and finishing of the product are given. The designed decoration combines cultural symbols, ergonomics and modern production approaches.

Keywords: jewelry, cuff, 3D modeling, die casting, silver, Quetzalcoatl, manufacturing technology

Ювелирное искусство на протяжении тысячелетий является не только способом украшения, но и инструментом выражения культурной идентичности, личных убеждений и эстетических предпочтений. В современном мире наблюдается тренд на индивидуализацию аксессуаров, когда потребители стремятся к уникальным изделиям, обладающим глубинной символикой. Особую популярность приобретают современные, эргономичные формы, такие как каффы – это украшения для ушей, которые позволяют украсить не только мочку, но и другие части уха, а также висок, шею или волосы. Кафф как тип украшения для уха представляет собой особую нишу на ювелирном рынке. В отличие от классических серег кафф фиксируется на хрящевой части ушной раковины, не требуя прокола мочки, что делает его привлекательным для широкой аудитории.

Вдохновением для дизайна украшения послужил Кетцалькоатль, «пернатый змей», – одно из центральных божеств в пантеонах ацтеков и майя, символ, объединяющий мудрость земли (змей) и небесную духовность (птица), а также одного из крупнейших известных представителей отряда птерозавров [1]. Он олицетворяет созидание, ветер, утреннюю звезду и жизнь (рис. 1).

В качестве материала было решено выбрать серебро. Серебро является ценным материалом благодаря комплексу физико-химических свойств, обеспечивающих его широкое промышленное и коммерческое применение. Значимым свойством серебра также является

олигодинамический эффект – способность ионов серебра подавлять жизнедеятельность микроорганизмов. Данное свойство применяется в медицине для антисептического покрытия инструментов и имплантатов, а также в системах очистки воды и бытовых товарах с антибактериальными функциями. С точки зрения эстетики серебро ценится за нейтральный белый блеск, универсальную сочетаемость с другими материалами и гипоаллергенность. Его относительно низкая стоимость по сравнению с другими драгоценными металлами обеспечивает доступность для массового производства [2].

Изделие представляет собой кафф, фиксирующийся на ухе в трех точках, с динамичным хвостом, предусматривающим крепление для подвесок (рис. 2).

Концепция украшения ориентирована на творческую, самодостаточную аудиторию, ценящую уникальные аксессуары с историческим подтекстом.

3D-модель изделия выполнена в программе Blender, так как она отвечает всем необходимым требованиям для создания высокодетализированных полигональных моделей и качественных рендеров [3].

Процесс изготовления изделия начинается с создания восковой модели с использованием фрезерного станка «Стриж-2М» (рис. 3). Фрезерный станок работает по заданной программе и обеспечивает высокую точность готовых изделий. Их качество будет высоким и без значительных расхождений между отдельными образцами, независимо от объема выпуска. Параллельно с повышением качества получаемой восковки существенно сокращается и время ее изготовления.



Рис. 1. Кетцалькоатль, один из крупнейших представителей отряда птерозавров



Рис. 2. Рендер изделия в программе Blender



Рис. 3. Фрезерный станок «Стриж-2М»

Процесс литья начинается с изготовления литейной формы. Для этого готовые восковые модели объединяются на одном стержне, образуя так называемую восковую «елку». Затем эту «елку» формуют в опоку-цилиндр для ювелирного литья с жидким гипсом внутри. При нагреве воск плавится и вытекает из отверстия опоки, а гипс застывает, образуя отливочную форму с пустотами, которые точно повторяют будущее изделие.

Далее в эти полости аккуратно заливают расплавленное серебро, заранее смешав с лигатурой – цинком, медью или никелем [4]. Процент тяжелых цветных металлов мал, и они положительно влияют на свойства всего сплава. После заливки форме дают остыть, далее «елку» открывают и снимают с нее полученные отливки (рис. 4).



Рис. 4. Части изделия с литниками

Так как изделие состоит из нескольких деталей, необходимо осуществить сборку. В ходе сборки изделия выполняются пайка, отбеливание, опилование, сверление и другие операции обработки металла (рис. 5).



Рис. 5. Пайка частей изделия

На предзаключительном этапе готовое изделие подвергается полированию и шлифованию (рис. 6, а, б). Шлифование – это обработка поверхности изделия при помощи напильника и наждачной бумаги в виде насадок для бормашины. При использовании полировальной машины для обработки украшений их поверхность становится гладкой и блестящей, создавая зеркальный эффект. Суть этого процесса заключается в удалении крошечных царапин и неровностей на поверхности, тем самым улучшая блеск и внешнюю привлекательность металла [5].



а



б

*Рис. 6. Изделие после шлифовки и полировки:
а – основная часть; б – хвост для расположения подвесок*

В результате разработана цифровая модель и технология изготовления ювелирного каффа в тематике Кетцалькоатля. Изделие отличается детализированным рельефом, эргономичной конструкцией и соответствует современным производственным стандартам. Использование серебра обеспечивает долговечность и эстетическую привлекательность. Проект демонстрирует эффективность применения 3D-моделирования в ювелирном деле для создания культурно-насыщенных и технологически сложных украшений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сказания о Солнцах. Мифы и исторические легенды науа / Ред. и пер. С.А. Куприенко, В.Н. Талах, 2014. – 377 с.
2. Воробьева, С.В. В-75 Методы анализа металлов платиновой группы, золота и серебра: методическое руководство / С.В. Воробьева. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 18 с.
3. Болсуновская, М.В. Компьютерная графика: Blender 3D: учеб. пособие / М.В. Болсуновская, А.А. Любченкова, В.В. Ракова. – Санкт-Петербург, 2021. – 118 с.
4. Новиков, В.П. Изготовление ювелирных изделий / В.П. Новиков, В.С. Павлов. – Москва: Изд-во «Континент», 1993. – 300 с.
5. Янг, А. Ювелирные техники. Энциклопедия / А. Янг. – Москва: Изд-во «Арт-Родник», 2008. – 256 с.

Секция 4. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ **В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 621.74.046

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В ОТЛИВКЕ «КОРПУС БУРОВОГО КЛЮЧА» ИЗ СТАЛИ МАРКИ 35ГЛ

Аникеев В.В. , доцент, к.т.н., доцент, **Куликов М.И.**, студент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: tlp@samgtu.ru

Представлены результаты влияния состава исходных шихтовых материалов, легирующих элементов, примесей и технологии отрезки прибылей на образование трещин в отливках «Корпус бурового ключа».

Ключевые слова: сталь, отливки, корпус бурового ключа, технология, качество

THE RESEARCH OF FACTORS FOR CRACK FORMATIONS IN THE CASTING “DRILLING RIG BODY” MADE OUT OF STEEL STAMP “35ГЛ”

Anikeev V.V. , Associate Professor, PhD in Engineering sciences, Associate Professor,
Kulikov M.I., student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: tlp@samgtu.ru

In this document are shown the results of influence of initial charge materials, alloy materials, impurities and the technological process of profit segment removal on the crack formations in the casting “Drilling rig body”.

Keywords: steel, castings, drilling rig body, technology, quality

Отливка «Корпус бурового ключа» АКБ-3М2.12.207 поставляется ОАО «Ижнефтемаш» (г. Ижевск). Она является составной частью бурового ключа, предназначенного для бурения нефтяных скважин (свинчивания и развинчивания труб на буровой вышке). Вес отливки – 740 кг, вес детали – 430 кг; изготавливается из низколегированной конструкционной стали марки 35ГЛ.

Внешний вид отливки корпуса бурового ключа со стороны зева диаметром 540 мм представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид отливки «Корпус бурового ключа»

Химический состав стали 35ГЛ, требуемые механические свойства отливок и режимы термической обработки представлены в ГОСТ 977-88 «Отливки стальные. Общие технические условия».

Отливки «Корпус бурового ключа» относятся к третьей группе контроля; поставляются по ГОСТ 977-88 с размерной точностью по ГОСТ Р53464-2009. К отливкам предъявляются следующие требования.

На необрабатываемой поверхности отливок не допускаются без исправления следующие дефекты: раковины диаметром более 5 мм и глубиной более 4 мм, расположенные на расстоянии, не превышающем 100 мм друг от друга; раковины группового расположения диаметром более 2 мм и глубиной более 3 мм в количестве не более 10-ти на площади не менее 20 см² с расстоянием между раковинами не более 5 мм; ужимины глубиной более 4 мм и длиной более 150 мм, занимающие площадь более 30 % поверхности, на которой они расположены; усадочные раковины и рыхлость в приливах диаметром 200–210 мм (пробных брусках для контроля механических свойств).

На обрабатываемой поверхности отливок корпуса бурового ключа допускаются любые дефекты в пределах 0,7 припуска на механическую обработку. Литейные дефекты, размеры которых выходят за указанные пределы и трещины, исправляются заваркой.

Не допускаются литейные дефекты и трещины на поверхности корпуса бурового ключа со стороны зева, ограниченной диаметром 540 мм.

Целью настоящей работы являлось изучение причин образования трещин в отливках «Корпус бурового ключа».

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

1. Определяли влияние основных технологических параметров выплавки и других переделов на трещиностойкость отливок. С этой целью:

1.1. Провели металлографические исследования образцов металла из зоны разрушения отливки и годного металла; изучили микроструктуру, неметаллические включения (количество, состав, размеры, расположение), вид излома по трещине и характер хрупкого разрушения стали.

1.2. Изучили состав шихтовых материалов; соотношение количества свежих материалов и отходов собственного производства.

1.3. Исследовали влияние технологии отрезки прибылей на образование трещин в отливках.

Металлографические исследования и изломы образцов стали с трещинами из отливок корпуса бурового ключа выявили по трещинам и в прилегающих к ним участках металла наличие прослоек в виде неметаллической фазы. Для изучения природы, состава, формы, расположения неметаллических включений и характеристики изломов дополнительно были проведены сравнительные микроисследования неметаллических включений и исследования изломов в образцах от 10 годных отливок корпуса бурового ключа и 10 отливок с трещинами.

Микроструктура металла изученных образцов – перлит+феррит – в основном равномерная (рис. 2). Излом ударных образцов в литом состоянии грубокристаллический с грубыми сколами и резко очерченными гранями; поверхность излома сильно окислена (рис. 3). У большинства образцов в районе трещины и на участках феррита на нетравленых шлифах наблюдается значительное количество неметаллических включений в виде грубых скоплений, цепочек, плен, чередующихся с включениями микропор. Загрязненность металла отливок с трещинами (рис. 4) имеет явную тенденцию локального ухудшения в участках, прилегающих к трещинам. Неметаллические включения характеризуются большими размерами и различной формой: округлые, каплевидные, остроугольные, угловатые, вытянутые. Включения располагаются в основном по границам зерен и дендритов в виде строчек и различных грубых скоплений; сопровождаются рыхлотами и несплошностями. Рыхлоты и несплошности заполнены сплошной цепочкой (пленой) неметаллических включений. Неметаллические включения, рыхлоты, несплошности, являясь концентраторами напряжений, ослабляют границы зерен, повышая склонность металла к охрупчиванию.

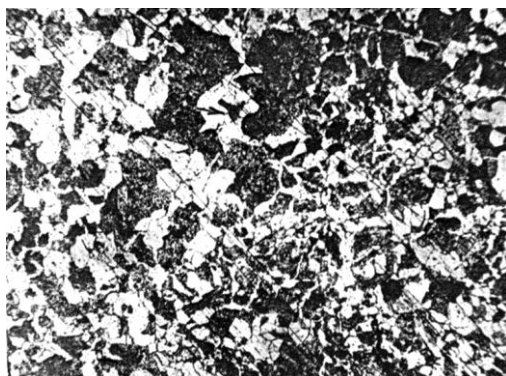


Рис. 2. Микроструктура металла перлит+феррит (×200)



Рис. 3. Излом в отливке по трещине (×100)

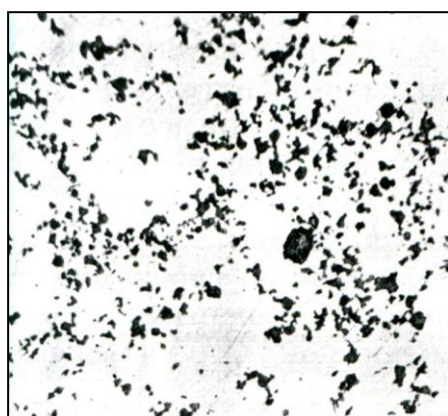


Рис. 4. Неметаллические включения в отливках с трещинами (×100)

Неметаллические включения в образцах здорового (годного) металла идентичны включениям в отливках без трещин. Загрязненность в основном характеризуется наличием мелких включений округлой, каплевидной и вытянутой формы, равномерно распределенных по всему сечению шлифов. Судя по внешнему виду включений, они представляют собой по своему составу сульфиды, оксисульфиды и оксиды. Образованию трещин способствовали загрязнение металла неметаллическими включениями и наличие надрывов, микротрещин, образовавшихся в период кристаллизации. Основные факторы, влияющие на образование трещин: загрязненность шихты, нарушение раскислительно-восстановительного периода плавки, повышенная температура металла при заливке и высокое содержание серы и фосфора.

Для определения влияния состава шихтовых материалов и их соотношения в завалке на образование трещин в отливках корпуса бурового ключа провели анализ различных вариантов шихтовки и их взаимосвязи с трещинами в отливках (см. таблицу).

Влияние состава шихты на образование трещин в отливках корпус бурового ключа

Варианты шихтовки	Соотношение шихтовых материалов, %		Количество проконтролированных ключей, шт.			Процент брака, %
	собственные отходы	покупной лом	всего	годных	забракованы по трещинам	
1	100	—	4	2	2	50,0
2	75	25	16	12	4	25,0
3	50	50	16	14	2	12,5
4	25	75	26	23	3	11,5
5	—	100	36	33	3	8,3

Примечание: соотношение шихтовых материалов может колебаться от вышеперечисленных в пределах $\pm 5\%$.

Полученные данные показывают, что все большее обновление шихты (большее использование свежих материалов – покупного лома) приводит к снижению отбраковки отливок корпуса бурового ключа по трещинам. Наилучшие результаты получены при использовании в качестве шихты 100 % покупного лома, особенно группы 8А (сталь марки 08кп). При правильном соблюдении технологии выплавки в этом случае образования трещин в отливках можно избежать. Неплохие результаты можно получить при использовании в составе шихты до 30 % отходов собственного производства, но только стали марки 35ГЛ, применяемой для получения отливок корпусов бурового ключа и выплавленной на шихте с содержанием не менее 70 % покупного лома с соблюдением всех технологических операций выплавки стали. В качестве отходов могут быть использованы отрезанные прибыли от отливок корпусов бурового ключа. Прибыли не должны быть загрязнены формовочной смесью.

На образование трещин в отливках большое влияние оказывают содержание легирующих элементов и примесей. При содержании марганца свыше 1 % возрастает горячеломкость стали в связи с понижением ее теплопроводности и увеличением литейно-термических напряжений. При содержании марганца около 1,5 % дальнейшее понижение теплопроводности в сочетании с увеличенной доперлитной усадкой приводит к резкому возрастанию горячеломкости стали.

Для нейтрализации вредного воздействия серы и фосфора на появление трещин необходимо ограничивать их содержание в стали (менее 0,020 % каждого элемента).

Одной из важных операций дальнейшей обработки отливок корпуса бурового ключа после выбивки их из форм и очистки от формовочной смеси является отрезка прибылей. Отрезку прибылей проводили с помощью газокислородного резака с полной отрезкой прибыли или оставлением ее части под дальнейшую механообработку (фрезерование) и на анодно-механическом станке. Анодно-механическая резка является наиболее приемлемой с точки зрения исключения образования трещин и их раскрытия при отрезке прибылей; однако этот процесс продолжителен. Наиболее производительным является процесс газокислородной резки прибылей, но при нем резко увеличивается количество отливок корпуса бурового ключа, пораженных трещинами. Снизить вероятность образования трещин при газокислородной резке можно путем оставления части прибыли (ориентировочно 80 мм) с дальнейшим ее фрезерованием. Введение новой операции – фрезерования – удлинит и удорожает процесс отрезки прибылей.

При газокислородной резке трещины образуются по рыхлости, чередующейся с участками плотного металла. Это говорит о том, что чем чище металл по неметаллическим и газовым включениям; вредным примесям (фосфору, сере), тем больше вероятность получения годных отливок (без трещин) даже при полной отрезке прибылей газокислородным резаком. Однако при этом (полной отрезке прибылей) необходимо учитывать, что сталь марки 35ГЛ при содержании марганца около 1,5 % имеет низкое значение теплопроводности и увеличенную доперлитную усадку, что приводит к горячеломкости стали. Поэтому при газокислородной отрезке прибылей это необходимо учитывать и обязательно соблюдать следующие условия:

1. Перед началом реза вначале прогреть наружные слои металла прибыли.
2. Резать медленно, давая прогреться последующим внутренним слоям металла прибыли.
3. Отрезанную прибыль оставлять на месте реза, не трогая как минимум в течение трех часов до ее полного остывания.

Соблюдение этих условий поможет исключить образование трещин в отливках корпуса бурового ключа при газокислородной резке прибылей.

Закключение:

1. При производстве отливок «Корпус бурового ключа» АКБ 3М2.12.207 из стали 35ГЛ имеет место проблема образования трещин в отливках после газокислородной отрезки прибылей.

2. Трещины располагаются по внешней и внутренней сторонам зева отливки диаметром 540 мм, у стяжки, в начале зева, и в хвостовой части диаметром 380 мм.

3. Металлографические исследования и изучение изломов образцов металла из зоны разрушения и годного металла выявили характер образования трещин – межкристаллический.

4. Причиной образования трещин являются значительная загрязненность границ кристаллов неметаллическими включениями (сульфидами, окисульфидами и оксидами) и повышенное содержание серы и фосфора в стали.

5. На образование трещин влияет качество шихтовых материалов. При использовании в качестве шихты 100 % покупного лома группы 8А (сталь марки 08кп) в виде пакетов по ГОСТ 2787-75 «Металлы черные вторичные» с низким содержанием серы и фосфора (0,010 % и 0,015 % соответственно) трещины не выявляются.

6. Допускается использование до 30 % отходов собственного производства стали 35ГЛ отливок корпуса бурового ключа, выплавленной на шихте с содержанием не менее 70 % покупного лома группы 8А с соблюдением технологических операций выплавки. Данные отходы необходимо складировать и хранить отдельно.

7. Для исключения образования трещин в отливках при газокислородной отрезке прибылей необходимо иметь содержание марганца в стали не более 1,40 % (при большем содержании резко снижается ее теплопроводность); резку проводить медленно, давая прогреться внутренним слоям металла прибыли.

8. При выполнении разработанных рекомендаций отливки «Корпус бурового ключа» удовлетворяют всем предъявляемым требованиям: брак по химанализу отсутствовал; трещин в отливках после отрезки прибылей не было. Механические свойства отливок превышают требования ГОСТ 977-88: предел прочности σ_b , МПа, – в 1,2 раза (655 против 540), относительное удлинение δ , %, – в 1,8 раз (22 против 12), предел текучести σ_t , МПа, – в 1,3 раза (370 против 294), относительное сужение ψ , %, – в 2,5 раза (50 против 20), ударная вязкость КСУ, кДж/м², – в 2,6 раза (770 против 294).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кремер, М.А. Фасонное литье из легированных сталей / М.А. Кремер. – Москва-Ленинград: Машиностроение, 1964. – 228 с.
2. Лапотышкин, Н.М. Трещины в стальных слитках / Н.М. Лапотышкин, А.В. Лейтес. – Москва: Металлургия, 1969. – 112 с.
3. Дефекты стали. Справочник / Под ред. С.М. Новокшеновой и М.И. Виноград. – Москва: Металлургия, 1984. – 199 с.
4. Воздвиженский, В.М. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении / В.М. Воздвиженский, В.А. Грачев, В.В. Спасский. – Москва: Машиностроение, 1984. – 432 с.

ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВ

Бедретдинов И.Р.^{1,2✉}, инженер-технолог I категории, аспирант,
Никитин К.В.², д.т.н., профессор

¹ ЗАО «Нефтефлот», г. Самара, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: ilham.bedrov@gmail.com

Рассмотрены основные проблемы возникновения дефектов сварных соединений в конструктивных узлах судов. Установлено, что указанные дефекты могут формироваться как в процессе сварки, так и в течение эксплуатации судна. На примере эксплуатации судна показано, что доля дефектных элементов, подлежащих замене, может составлять до 30 % в зависимости от элемента конструкции. Предложен перспективный подход к повышению качества сварных соединений, который будет способствовать увеличению срока эксплуатации без замены элементов конструкции судна. Данный подход базируется на роботизации процесса сварки и его гибридизация с дополнительными видами внешних воздействий на сварной шов и околошовную зону. Эффективным элементом гибридной технологии является воздействие на сварной шов импульсными магнитными полями.

Ключевые слова: судостроение, электродуговая сварка, роботизация процесса сварки, гибридные технологии, магнитно-импульсная обработка

MAIN DEFECTS OF WELDED JOINTS AND THEIR CAUSES DURING THE MANUFACTURE AND OPERATION OF SHIP HOUSES

Bedretdinov I.R.^{1,2✉}, process engineer, category I, PhD student,
Nikitin K.V., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

¹ CJSC Nefteflot, Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: ilham.bedrov@gmail.com

The main problems of weld defects occurrence in structural units of vessels are considered. It is established that the specified defects can be formed both in the welding process and during the operation of the vessel. On the example of the operation of the vessel, it is shown that the share of defective elements to be replaced can be up to 30 %, depending on the structural element. A promising approach to improving the quality of weldments is proposed, which will contribute to increasing the service life without replacing the structural elements of the vessel. This approach is based on the robotization of the welding process and its hybridization with additional types of external influences on the weld and the near-weld area. An effective element of the hybrid technology is the impact of pulsed magnetic fields on the weld.

Keywords: shipbuilding, electric arc welding, robotization of the welding process, hybrid technologies, magnetic pulse processing

Обеспечение надежной работы корпусных конструкций во время эксплуатации судов – одна из важнейших проблем, которая должна решаться в процессе проектирования и постройки судна. Корпус судна является сложной системой, состоящей из большого числа конструктивных узлов, связанных между собой. Конструктивные узлы также являются самостоятельными системами, которые образованы отдельными элементами. Причинами повреждения судна в процессе эксплуатации являются недостаточная прочность конструкции, заложенная при проектировании; воздействие внешних факторов (длительный контакт с агрессивными средами, вибрации и т. д.); дефекты, обусловленные технологическими нарушениями в процессе сборки; совокупность перечисленных причин.

Как показывают многолетние наблюдения за судами, находящимися в эксплуатации, наиболее частыми причинами повреждения корпусных конструкций являются: резкие изменения сечения отдельных связей по длине судна; обрыв связей с образованием жестких точек; непредусмотренные условия эксплуатации связей и узлов; концентрация напряжений в сварных швах и узлах конструкции [1].

Количество конструктивных узлов с концентрацией напряжений обуславливают лимит прочности судового корпуса в целом. За счет сокращения конструктивных узлов с концентрациями напряжения возникает возможность уменьшить размеры всех связей корпуса и облегчить его, что положительно скажется на грузопместимости судна, стоимости и сроках его постройки.

В настоящее время сварные соединения являются основным способом соединения конструктивных узлов и корпусных конструкций при сборке судна. В зависимости от типа судна и действующего технологического процесса протяженность сварных швов от общей протяженности соединений может составлять: в нижнем положении ~70 %; в вертикальном положении ~20 %; в горизонтальном и потолочном положениях ~10 % [2].

Виды сварных соединений, применяемых в судостроении, и их характеристики представлены в табл. 1 [3]. В зависимости от технологии сварки и используемых присадочных материалов могут возникать различные дефекты сварных швов (табл. 2) [4].

Таблица 1

Виды сварных соединений в судостроении

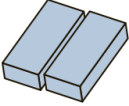
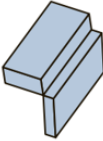
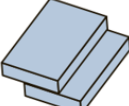
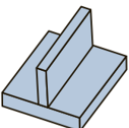
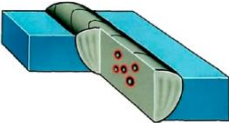
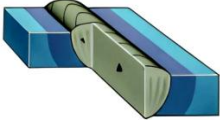
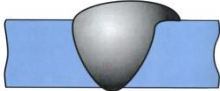
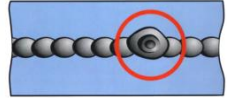
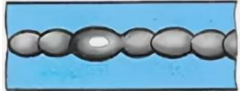
№ п/п	Наименование сварного соединения	Вид сварного соединения	Описание
1	Стыковое		Соединение двух элементов, примыкающих друг к другу торцевыми поверхностями
2	Угловое		Сварное соединение двух элементов, расположенных под углом и сваренных в месте привыкания их краев
3	Нахлесточное		Сварное соединение, в котором сваренные элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга
4	Тавровое		Сварное соединение, в котором торец одного элемента примыкает под углом и приварен к боковой поверхности другого элемента

Таблица 2

Основные дефекты сварных швов

№ п/п	Наименование и описание дефекта	Вид	Причина возникновения
Внутренние			
1	Внутренние поры или группы пор. Представляют собой газовые включения (образования), не успевшие подняться на поверхность в расплавленном металле сварного соединения. Пора – заполненная газом полость округлой формы		– влажный флюс; – отсыревшие электроды; – длина дуга; – некачественная защита; – некачественный основной металл; – увеличенная скорость сварки; – некачественная подготовка свариваемых кромок и поверхности сварочной проволоки; – увеличенный диаметр электрода

№ п/п	Наименование и описание дефекта	Вид	Причина возникновения
2	Шлаковые включения – это полости в металле, в том числе сварном шве, заполненные шлаком. В них находятся неметаллические материалы, окислы и их комплексы		– некачественная подготовка поверхности; – некачественный основной металл; – нарушение технологии сварки; – нарушение защиты
3	Непровар – местное несоединение элементов		Неполное расплавление кромок основного металла или поверхности ранее выполненных валиков
4	Трещины – разрывы внутри шва или зоны термического влияния. Могут быть горячими (возникают в процессе сварки) и холодными (появляются после остывания металла)		– жесткая конструкция изделия; – сварка в жестко закрепленных приспособлениях; – длительное время между сваркой и термообработкой; – высокая скорость охлаждения; – нарушение технологии; – нарушение защиты; – некачественный основной металл
5	Скопления несплавленного металла. Приводят к снижению прочности шва и возможному разрушению конструкции		Возникают при неправильной технике сварки и недостаточном проплавлении
Поверхностные			
6	Подрезы – углубления в основном металле вдоль линии сплавления		– большой ток; – высокая скорость сварочных работ; – длинная дуга; – наклон электрода (неправильное ведение)
7	Наплывы – дефект в виде металла, натекшего в процессе сварки (наплавки) на поверхность сваренных (наплавленных) деталей или ранее сформировавшихся валиков и не сплавившегося с ними		Чаще всего дефект образуется при горизонтальной сварке стыковых или угловых швов
8	Кратеры. Усадочная раковина сварного шва – дефект в виде полости или впадины		Усадка металла при затвердевании (располагается, как правило, в местах обрыва дуги или окончания сварки)
9	Свищи – дефект в виде воронкообразного или трубчатого углубления в сварном шве		– некачественный основной металл; – нарушение защиты
10	Прожоги – дефект в виде сквозного отверстия в сварном шве, образовавшийся вследствие вытекания части жидкого металла сварочной ванны в процессе выполнения сварки		– высокая погонная энергия; – увеличенный зазор; – малая величина притупления; – большое смещение кромок; – коробление кромок и отставание их от подкладки при сварке

Дефекты сварных швов могут возникать как в процессе сварки, так и в процессе эксплуатации судна [5, 6]. Формирование дефектов в процессе проведения сварочных работ обусловлено следующими основными причинами: нарушение технологии сварки (выбор сварочных материалов и режимов сварки и т. п.); ошибки при проектировании типоразмера сварных швов (неправильное определение типоразмера сварных соединений, формы сварных швов и зон сопряжения соединяемых элементов); неудовлетворительная свариваемость металла (плохое качество электродов, покрытий и флюсов и т. д.).

Дефекты в процессе эксплуатации судна возникают из-за экстремальных нагрузок на корпусные конструкции; длительных постоянных и переменных нагрузок воздействий на сварные конструкции судна; коррозионного износа [6].

Основные требования к подготовке и выполнению сварочных работ изложены в [7]. Для контроля качества сварных соединений используют следующие виды контроля: внешний осмотр и измерение; радиографический метод; ультразвуковой метод; метод испытаний на непроницаемость и герметичность; иные методы неразрушающего контроля, предусмотренные нормативной документацией, одобренной регистром судоходства (РС).

На примере эксплуатируемого судна «Волгонепфть-38» был выполнен анализ остаточных толщин обшивки корпуса в зонах сварных соединений, благодаря которому было выявлено количество элементов конструкции, имеющих критические дефекты и подлежащие замене (см. рисунок). Видно, что количество выявленных элементов конструкции, подлежащих замене, составляет 32 % по обшивке корпуса и 25 % – по набору на обшивке.

При сравнении остаточных толщин в одном и том же районе можно сделать вывод о состоянии листов, составляющих измеряемый участок корпуса. Зная среднее уменьшение толщины элемента конструкции корпуса в процессе эксплуатации за 1 год, можно вычислить примерное время замены элемента, а также примерный срок службы замененной части.

Например, при вступлении в эксплуатацию судна значение толщины днищевой обшивки на днище в районе грузовых танков равно 7,0 мм. В процессе эксплуатации, согласно табл. 1.1.5.2 [8], при среднегодовом уменьшении толщины элемента конструкции, равной 0,17 мм/год, а также согласно табл. 3.5.5 [9] допускаемая толщина элемента конструкции равна 5,9 мм. Таким образом, изначальная толщина элемента, равная 7 мм, достигнет допустимой в течение примерно 6,5 лет эксплуатации.

Перспективным направлением в повышении качества протяженных сварных швов является роботизация процесса сварки [10] и его гибридизация с дополнительными видами внешних воздействий на сварной шов и околошовную зону.



□ Общее количество замеров

■ Количество конструктивных элементов под замену

Количество дефектных элементов, подлежащих замене
в зависимости от элементов конструкции

Разработка гибридных технологий и процессов в настоящее время является одной из ведущих стратегий в создании более гибких и эффективных производственных систем и процессов. В общем случае под гибридизацией понимают сочетание традиционных и нетрадиционных процессов производства (обработки), объединенных в два или более отдельных процессов обработки/производства [11].

Применительно к роботизированным процессам сварки в качестве гибридной технологии можно рассматривать систему «электродуговая сварка – магнитно-импульсное воздействие». В работе [12] показано, что при совмещенном процессе электродуговой сварки листов из алюминиевого сплава АД1Н и магнитно-импульсной обработки (МИО) происходит измельчение структурных составляющих и улучшение механических свойств сварного шва. Таким образом, было показано, что возникновение дефектов в сварных швах в основном вызвано нарушением технологического процесса сварочных работ, режимов сварки, используемых сварочных материалов, некачественной обработкой свариваемых стыков, наличием дефектов в самих свариваемых изделиях. Возникающие дефекты в процессе эксплуатации в основном связаны с возникновением чрезмерных нагрузок в судовых конструкциях, которые приводят к разрушению и последующей коррозии не только в районе сварных швов, но и в поврежденной части. Также на целостность конструкции существенное влияние оказывают условия эксплуатации (чрезмерный перепад температур в районе эксплуатации, соленость среды, наличие биологической формы жизни, способствующей активным коррозионным процессам). В связи с вышеперечисленным актуальным направлением являются исследования, направленные на обеспечение гарантированного запаса прочности сварных соединений за счет роботизации процесса сварки и его гибридизации с дополнительными внешними воздействиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Повреждения судовых конструкций / Н.В. Барабанов, Н.А. Иванов, В.В. Новиков, В.А. Окишев, И.М. Чибирик. – Ленинград: Судостроение, 1977. – 400 с.
2. Мацкевич, В.Д. Сборка и сварка корпусов судов / В.Д. Мацкевич. – Ленинград: Судостроение, 1968. – 402 с.
3. Овчинников, В.В. Технология ручной дуговой и плазменной сварки и резки металлов / В.В. Овчинников. – 5-е изд. – Москва: Издательский центр «Академия», 2016. – 240 с.
4. Калиниченко, Н.П. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла / Н.П. Калиниченко, М.А. Васильева, А.Ю. Радостев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 71 с.
5. Нгуен, З.Л. Влияние нетрещиноподобных дефектов на механические свойства сварных соединений корпусов судов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / З.Л. Нгуен. – Астрахань, 2021. – 24 с.
6. Пашева, Т.Ю. Повышение качества изготовления корпусных конструкций судов путем совершенствования управления технологическими процессами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.Ю. Пашева. – Мурманск, 2012. – 23 с.
7. Бедретдинов, И.Р. Пути повышения качества сварных швов в судостроительном производстве / И.Р. Бедретдинов / Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – 2024. – С. 202–205.
8. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. – Санкт-Петербург: Морской регистр судоходства, 2020. – 294 с.
9. Правила освидетельствования судов в процессе эксплуатации. – Москва: Российский речной регистр, 2015. – 154 с.
10. Краснова, Е.В. Гибридные технологии и оборудование / Е.В. Краснова, Б.П. Саушкин // Ритм машиностроения. – 2021. – № 4. – С. 73–83.
11. Применение магнитно-импульсной обработки при электродуговой сварке сплава АД1Н / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.Г. Черников, А.К. Скороумов, Д.А. Дунаев, В.А. Новиков // Литье и металлургия. – 2023. – № 4. – С. 101–108.
12. Руководство по технологическому наблюдению за применением сварки в судостроении и судоремонте. – Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2010. – 226 с.

ПРИМЕНЕНИЕ АНОДНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СТАЛИ 09Г2С

Бойко К.С. , магистрант, Малышев В.Н., профессор, д.т.н., профессор

РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация
E-mail: kirillboyko1911@gmail.com

Проведены исследования, направленные на изучение свойств анодной электролитно-плазменной обработки на примере стали 09Г2С. По итогу испытаний представлены результаты влияния анодной электролитно-плазменной обработки на механические свойства поверхностного слоя стали 09Г2С. Отмечена перспективность использования анодной электролитно-плазменной обработки для улучшения механических свойств оборудования, работающего в нефтегазовом комплексе.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, металлографический анализ, структура стали, сила тока

APPLICATION OF ANODIC ELECTROLYTIC PLASMA TREATMENT FOR 09G2S STEEL

Boyko K.S. , Master's Degree student, Malyshev V.N., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
Moscow, Russian Federation
E-mail: kirillboyko1911@gmail.com

This work involved research aimed at studying the properties of anodic electrolytic plasma treatment using 09G2S steel as an example. The results of the tests showed the effect of anodic electrolytic plasma treatment on mechanical properties of the surface layer of 09G2S steel. The promising use of anodic electrolytic plasma treatment to improve the mechanical properties of equipment operating in the oil and gas industry was noted.

Keywords: electrolytic plasma treatment, metallographic analysis, steel structure, current strength

Сталь 09Г2С является наиболее часто применяемым материалом для производства труб нефтегазового сортамента. В зависимости от назначения часть таких труб имеет резьбовые соединения, подвергающиеся периодическим операциям свинчивания-развинчивания. Резьбовая поверхность труб при этом испытывает значительные изнашивающие нагрузки. В настоящее время существуют различные способы улучшения свойств и триботехнических характеристик поверхностного слоя. Однако наиболее популярные методы термической и химико-термической обработки не используются для труб стали 09Г2С по технико-экономическим показателям [1]. Для локальной обработки резьбовых поверхностей таких труб одним из наиболее перспективных методов является электролитно-плазменная обработка.

Электролитно-плазменное упрочнение представляет собой сложную технологию, которая использует разряды, возникающие на поверхности металла, погруженного в электролит. В зоне разряда в электролите, примыкающем к поверхности образца, образуется ионизированный паро-фазовый канал, обеспечивающий протекание тока и активизирующий контакт поверхностного слоя металла с электролитом [2]. Цель процесса электролитно-плазменной обработки состоит в том, чтобы обеспечить формирование на поверхности изделия слоя, насыщенного азотом и углеродом, за счет ускоренной диффузии элементов в зоне действия электрического разряда. Толщина такого слоя варьируется от 2 до 10 мм. Малая зона высокотемпературного нагрева обеспечивает ускоренное охлаждение стальной поверхности, а повышенное содержание азота и углерода способствует формированию закалочных структур.

Наличие упрочняющих фаз способствует росту стойкости поверхностного слоя к действию изнашивающих нагрузок. Также данный метод обработки снижает воздействие циклических нагрузок на металл, так как происходит распределение напряжений, и помогает противостоять абразивному износу, потому что твердость поверхностного слоя значительно повышается.

Проведение испытаний по обработке образцов происходило на установке для анодной электролитно-плазменной обработки, установленной в РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

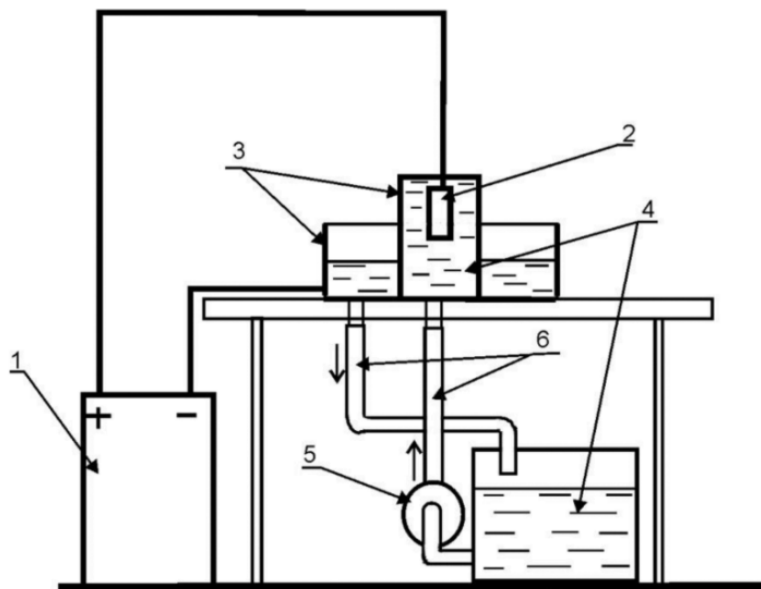


Рис. 1. Схема установки для анодной электролитно-плазменной обработки:

1 – источник питания; 2 – образец (анод); 3 – катод; 4 – электролит; 5 – насос;
6 – шланги для ввода и вывода электролита

Принцип работы установки (рис. 1): источник питания (1) был подключен к образцу (2), исполняющий роль анода, и к ванне с электролитом (3), являющейся катодом. Для создания износостойкой поверхности при включенном источнике питания образец с подключенной к нему термопарой медленно опускался в раствор электролита, вокруг образца образовывалась парогазовая оболочка, которую пробивали микродуговые разряды, обрабатывающие поверхность образца. По прошествии 2–3 минут источник питания выключался, дуговые разряды прекращали свое действие, образец охлаждался протекающим вдоль него электролитом. По завершении охлаждения (заковки) образец извлекался из ванны. Для предотвращения перегрева электролита и обеспечения его циркуляции к емкости были подключены шланги (6) и насос (5). Термопара, присоединенная к образцу и подключенная к мультиметру, позволяла фиксировать температуру образца.

Основными параметрами, влияющими на триботехнические свойства при анодной электролитно-плазменной обработке, являются: сила тока, напряжение, состав электролита и время погружения детали. Сила тока и напряжение влияют на протекание процесса обработки, а также на температуру, до которой нагревается образец, что в свою очередь делает возможным процесс заковки. Состав электролита влияет на насыщение поверхности различными химическими элементами для придания поверхности определенных свойств [3]. Значение силы тока находилось в диапазоне 4–6 А, напряжение – 200–240 В. Время упрочнения образца составляло 3 минуты. Химический состав электролита: вода дистиллированная – 82 %, хлорид аммония – 10 %, глицерин – 5 %, карбамид (мочевина) – 3 %.

Добавление глицерина позволяет повысить содержание углерода в поверхностном слое (цементация), а мочевины – насытить поверхность обрабатываемых образцов углеродом и азотом. Хлорид аммония необходим для обеспечения электропроводности раствора электролита.

В процессе электролитно-плазменной обработки температура образцов фиксировалась хромель-алюмелевой термопарой и составляла 900 °С.

После проведения процесса обработки образцов производилось испытание на абразивное изнашивание. Процесс испытания на абразивное изнашивание представлял собой механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия на него абразивных частиц, находящихся в закреплённом состоянии.

Образцы перемещались от края абразивного круга диаметром 245 мм до его середины и обратно в течение 10 секунд под нагрузкой 0,5 кг по спирали Архимеда (по новому следу) при постоянной частоте вращения 30 об/мин. Для изучения зависимости интенсивности изнашивания образцов от степени износа было проведено 4 испытания. Износ поверхности определялся после каждого испытания весовым методом. Полученные данные представлены в таблице.

Данные, полученные при абразивном изнашивании образцов

Путь трения, м	Образец без термообработки		Образец после электролитно-плазменной обработки	
	Масса образцов, г	Износ, г	Масса образцов, г	Износ, г
0	6,5564	–	6,4272	–
7,8	6,5008	0,0556	6,4268	0,0004
15,6	6,4452	0,0556	6,4176	0,0092
23,4	6,3896	0,0556	6,4059	0,0117
31,2	6,334	0,0556	6,3458	0,0601

Анализ полученных данных показывает, что формирование поверхностного слоя после электролитно-плазменной обработки обеспечивает увеличение износостойкости стали 09Г2С более чем в 2,5 раза. Сохранение массы образца, подвергнутого обработке, на одном и том же уровне при испытаниях на пути трения до 20 м говорит об однородности полученного структурно-фазового строения слоя (рис. 2).

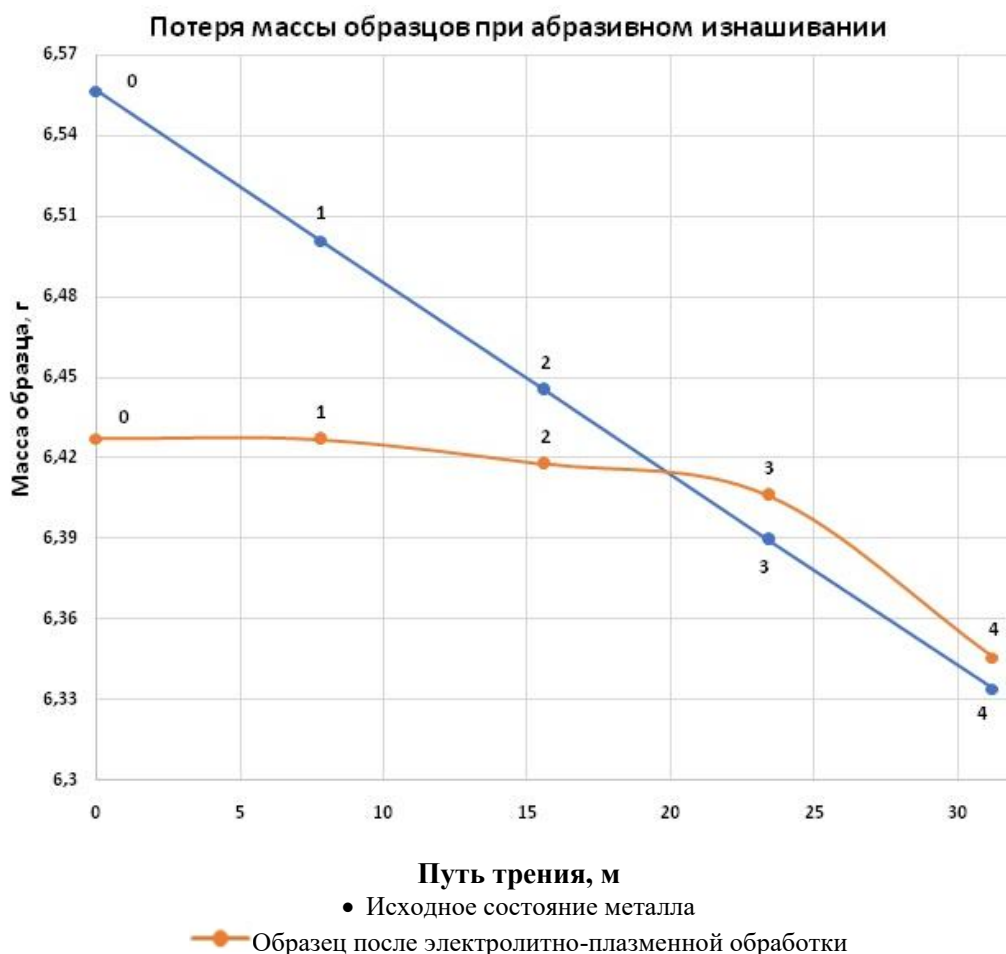


Рис. 2. Диаграмма изменения массы образцов при абразивном изнашивании

Таким образом, полученные результаты показывают, что проведение электролитно-плазменной обработки способствует повышению износостойкости стали 09Г2С благодаря насыщению поверхностного слоя азотом и углеродом с последующим ускоренным охлаждением и формированием мартенситной структуры. Такое изменение химического состава и структуры поверхности дополнительно увеличивает твердость стали 09Г2С, которая в исходном состоянии относится к группе сталей с низкой закаливаемостью.

Результаты испытаний на абразивное изнашивание показали, что при анодной электролитно-плазменной обработке в поверхностном слое получен мартенсит, формированию которого способствовал рост концентрации углерода как элемента, образующего мартенсит, и содержания азота, снижающего точку полиморфных превращений.

Сфера применения анодной электролитно-плазменной обработки для создания специальных свойств поверхности деталей достаточно обширна. Она может представлять интерес для различных отраслей промышленности, включая машиностроение, автомобильную отрасль, а также применяться для упрочнения деталей с малой величиной допуска, работающих в условиях знакопеременных нагрузок на износ, например, зубчатых колес, валов и других ответственных деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Электролитно-плазменное упрочнение [Электронный ресурс]. – URL: <https://extxe.com/9585/jelektrolitno-plazmennoe-uprochnenie/> (дата обращения: 30.01.2026).
2. Сатбаева, З.А. Исследование механических и трибологических свойств хромоникелевой стали при электролитно-плазменном упрочнении / З.А. Сатбаева // Академический форум молодых ученых стран Большой Евразии «Континент науки»: Сборник тезисов докладов, Москва, 1–4 ноября 2023 года. – Москва: Центр научно-технических решений, 2023. – С. 615–617.
3. Malyshev, V.N. Oil and gas steels surface hardening investigation by anodic plasma electrolytic treatment / V.N. Malyshev // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2022. – Vol. 179. – P. 109055.

СОСТАВ И СВОЙСТВА УПРОЧНЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЙОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СМАЗОЧНОЙ КОМПОЗИЦИИ

Бутенко В.И. , д.т.н., профессор

Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
E-mail: butenkoviktor@yandex.ru

Представлены результаты исследования элементного состава и свойств упрочненных поверхностных слоев деталей машин при подаче в зону контакта инструмента и обрабатываемой поверхности йодосодержащей смазочной композиции. Отмечена целесообразность применения йодосодержащей смазочной композиции при упрочняющей обработке деталей для повышения их эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: поверхностный слой, элементный состав, упрочнение, йодосодержащая смазочная композиция

COMPOSITION AND PROPERTIES OF HARDENED SURFACE LAYERS OF PARTS USING A IODINE-CONTAINING LUBRICANT COMPOSITION

Butenko V.I. , Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
E-mail: butenkoviktor@yandex.ru

The results of the study of the elemental composition and properties of the hardened surface layers of machine parts are presented when an iodine-containing lubricant composition is applied to the contact zone of the tool and the machined surface. The expediency of using an iodine-containing lubricant composition for the hardening treatment of parts to improve their performance properties is noted.

Keywords: surface layer, elemental composition, hardening, iodine-containing lubricant composition

В работах [1–3] показана возможность создания в процессе упрочняющей обработки деталей машин (ДМ) на их поверхностях нанослой йодидов железа, обладающих низким коэффициентом трения, а деформируемый в зоне контакта упрочняющего инструмента с поверхностью детали тонкий слой металла приобретает повышенную пластичность и другие свойства в результате адсорбционно-пластифицирующего действия инструмента и среды. В связи с этим практическую значимость представляет определение элементного состава материала упрочненного поверхностного слоя (ПС) детали, подвергнутой, например, обкатке с использованием йодосодержащей смазочной композиции, подаваемой в зону контакта упрочняющего ролика с обрабатываемой поверхностью. От удельного веса элементов, входящих в сформировавшийся в процессе упрочняющей обработки детали ПС, зависит период сохраняемости нанослой йодидов железа, влияющий на эксплуатационные показатели детали, например, коэффициент трения $f_{тр}$.

Проведены исследования влияния способов и режимов предварительной обработки плоских поверхностей ДМ на толщину получаемого в процессе последующей упрочняющей обработки йодосодержащего слоя h_c и коэффициент трения $f_{тр}$. Показателями состояния ПС исследуемых образцов после их предварительной обработки были приняты:

– параметр шероховатости Ra , который фиксировался портативным профилометром мод. SurfTestSJ-210;

– технологические остаточные напряжения в материале ПС $\sigma_{ост}$, определяемые на автоматизированной системе АСКОН-3-КАИ;

– толщина ПС с измененными физико-механическими свойствами ΔH , определяемая при помощи специального четырехзондового устройства [4].

Толщина создаваемого на поверхности детали йодосодержащего слоя h_c определялась при помощи толщиномера «Константа К-5». В качестве способов предварительной обработки плоских поверхностей деталей рассматривались следующие: плоское шлифование, чистовое фрезерование цилиндрической фрезой, чистовое строгание, наружное протягивание, абразивная доводка текстолитовым притиром [1], обкатка поверхности роликом.

В табл. 1 приведены средние значения величин Ra , $\sigma_{ост}$, ΔH , h_c и $f_{тр}$, полученные по результатам пяти последовательно проведенных экспериментов в зависимости от способов предварительной обработки плоских поверхностей деталей, анализ которых указывает на то, что эксплуатационные свойства созданного в процессе упрочняющей обработки йодосодержащего слоя, выраженные через коэффициент трения $f_{тр}$, и его толщина h_c во многом зависят от принятого способа предварительной обработки поверхности.

Таблица 1

Зависимость коэффициента трения от способов и режимов предварительной обработки плоской поверхности детали

Способ предварительной обработки	Режимы предварительной обработки	Начальное состояние поверхности			Толщина йодосодержащего слоя h_c , нм	Коэффициент трения $f_{тр}$
		Ra , мкм	$\sigma_{ост}$, МПа	ΔH , мм		
Шлифование	$V_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 0,02$ м/с; $S_{вр} = 0,01$ мм/дв.х.; $m = 3$	1,6	+310	0,32	30	0,20
Чистовое фрезерование	$V = 2,5$ м/с; $S_{мин} = 120$ мм/мин; $t = 0,5$ мм	2,4	+280	0,28	25	0,22
Чистовое строгание	$V = 0,03$ м/с; $t = 0,5$ мм	2,2	+270	0,25	25	0,22
Протягивание	$V = 0,02$ м/с; $a_z = 0,05$ мм/зуб	2,8	+270	0,23	20	0,21
Доводка текстолитовым притиром	$V = 0,05$ мм/с; $p = 0,01$ МПа; $m = 3$	1,0	> +50	0,05	40	0,17
Обкатка	$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,02$ мм/с; $m = 2$	1,6	-330	0,51	40	0,16

Установлено, что на эксплуатационные свойства упрочненных йодосодержащих ПС деталей существенное влияние оказывают начальные значения параметра шероховатости Ra , а также величина и знак предварительно созданных в материале ПС технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$. Наилучшие показатели по параметрам h_c и $f_{тр}$ получены при назначении в качестве предварительной обработки поверхности детали обкатки или абразивной доводки текстолитовым притиром.

Исследования состава и свойств материала упрочненных поверхностей деталей, сформировавшихся при обкатке их с использованием йодосодержащей смазочной композиции, проводились на плоских образцах из стали 12ХН3А. Поверхности исследуемых образцов, прошедшие предварительную обработку, подвергались обкатке упрочняющим роликом, который был изготовлен из быстрорежущей стали Р6М5 и после закалки до твердости HRC 62–65 имел следующую характеристику: диаметр наружной поверхности – 48 мм, высота – 16 мм, радиус рабочего профиля – 20 мм, фаска профиля – 2 мм, шероховатость по наружной поверхности ролика – $Ra = (0,16–0,20)$ мкм. В исследованиях упрочняющий ролик по посад-

ке устанавливался на оси специального устройства для упрочняющей обработки плоских поверхностей ДМ [1, 2, 5], которое, в свою очередь, с помощью конусного хвостовика закреплялось в шпинделе вертикально-фрезерного станка мод. 6Н12ПБ. В качестве смазочной композиции, подаваемой капельным путем в зону контакта упрочняющего ролика с обрабатываемым материалом, использовалась смесь, содержащая в одном литре масла «Индустриальное И-20А» 20 мл этилового спирта и 3 г кристаллического йода [1, 6].

Поверхности исследуемых образцов подвергались обкатке роликом на следующих режимах: нагружающее усилие ролика $P = (490\text{--}980)$ Н, скорость продольного перемещения стола станка с закрепленным на нем исследуемым образцом $S_{пр} = (0,01\text{--}0,03)$ м/с, поперечная подача стола станка $S_{поп} = 0,5$ мм/дв. ход, число проходов ролика $m = 1\text{--}3$. Для оценки эффективности применения йодосодержащей смазочной композиции при упрочняющей обработке поверхностей ДМ на установке для испытания материалов на истирание [2] определялись сила $F_{тр}$ и коэффициент $f_{тр}$ трения. Исследования эксплуатационных показателей $F_{тр}$ и $f_{тр}$ упрочненных поверхностей образцов осуществлялось при скорости скольжения контртела $V_{ск} = 0,05$ м/с и давлении $q = 0,3$ МПа. Сопряженной деталью (контртелом) были бруски из закаленной быстрорежущей стали Р6М5, рабочие поверхности которых подвергались шлифованию до шероховатости $Ra = (0,16\text{--}0,20)$ мкм.

Для исследования элементного состава спектра состояния ПС образцов, сформированного в результате упрочняющей обработки его роликом с использованием йодосодержащей смазочной композиции, был применен сканирующий (растровый) электронный микроскоп (SEM) ZeissEVOMA 18 с приставкой энергодисперсионного анализатора X-Max 50-N и программным обеспечением Aztec. Установлено, что с увеличением нагружающего усилия УР P на поверхность исследуемого образца при одних и тех же значениях режимных показателей $S_{пр}$, $S_{поп}$ и m содержание йода в материале ПС увеличивается до некоторого критического значения силы P , обусловленной состоянием и прочностными свойствами обрабатываемой стали, содержанием йода в смазочной композиции, а также формой и размерами рабочего профиля упрочняющего ролика (табл. 2). Увеличение скорости продольного перемещения стола станка $S_{пр}$ приводит к незначительному уменьшению содержания йода в материале упрочненного ПС образца, а число проходов ролика m влияет на содержание йода в ПС в зависимости от усилия P .

Таблица 2

**Содержание йода в материале ПС образцов из стали 12ХН3А
в зависимости от режимов упрочняющей обработки ($S_{поп} = 0,5$ мм/дв. ход)**

№ эксп.	Режимы упрочняющей обработки			Содержание йода, %
	P , Н	$S_{пр}$, м/с	m	
1	490	0,01	1	2,66
2	735	0,01	1	3,15
3	980	0,01	1	3,92
4	490	0,02	1	3,48
5	735	0,02	1	3,74
6	980	0,02	1	4,11
7	490	0,02	2	3,50
8	735	0,02	2	3,79
9	980	0,02	2	4,14
10	735	0,03	1	3,15
11	735	0,03	2	3,86
12	735	0,03	3	3,91
13	980	0,03	2	4,16
14	980	0,02	3	4,05
15	980	0,03	3	4,18

Для трехмерного анализа структуры обработанной упрочняющим роликом поверхности исследуемого образца использовался интерференционный микроскоп – оптический профилометр NewView-600 фирмы ZYGO. Было установлено, что структура и состояние упрочненных йодосодержащих ПС деталей, влияющих на силу трения $F_{тр}$ и коэффициент трения $f_{тр}$, зависят как от способа предварительной обработки поверхности, так и от режимов окончательной упрочняющей обработки. В связи с этим были проведены исследования колебания силы трения $\Delta F_{тр}$ от режимов упрочняющей обработки с использованием йодосодержащей смазочной композиции при постоянном давлении контртела $q = 0,3$ МПа и скорости скольжения контактируемых поверхностей трибосистемы $V_{ск} = 0,05$ м/с. Наилучшие результаты по эффективности применения упрочненных йодосодержащих слоев достигаются при нагрузочном усилии упрочняющего ролика $P = 735$ Н, продольном перемещении стола с закрепленным образцом $S_{пр} = 0,01$ мм/с и числе его проходов $m = 2$ (табл. 3).

Исследованиями было установлено, что на распределение йодидов железа по упрочненной поверхности образцов нагружающее усилие ролика P влияет в большей мере, чем скорость продольного перемещения стола станка $S_{пр}$. При значениях нагружающего усилия $P > 1500$ Н (давление ролика на поверхность детали $p > 0,5$ МПа) равномерность распределения йодидов железа по обработанной поверхности нарушается, что приводит к увеличению коэффициента трения в контактной зоне сопряженных деталей при их эксплуатации.

Таблица 3

Влияние режимов обработки на состояние упрочненного йодосодержащего ПС и показатели трения в зоне контакта «образец – контртело»

Режимы упрочняющей обработки	Состояние поверхностного слоя		Показатели трения в зоне контакта		
	Ra , мкм	h_c , нм	$(F_{тр})_{ср}$, Н	$\Delta F_{тр}$, Н	$f_{тр}$
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,01$ м/с; $m = 1$	0,21	25	20,4	3,0	0,21
$P = 986$ Н; $S_{пр} = 0,01$ м/с; $m = 1$	0,23	35	21,5	3,5	0,20
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,02$ м/с; $m = 1$	0,20	30	20,6	2,8	0,21
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,03$ м/с; $m = 1$	0,22	35	21,8	3,2	0,20
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,01$ м/с; $m = 2$	0,17	40	20,1	1,3	0,18
$P = 735$ Н; $S_{пр} = 0,01$ м/с; $m = 3$	0,17	40	21,3	2,6	0,20

Изменение скорости продольного перемещения стола станка $S_{пр}$ в диапазоне (0,01–0,03) м/с при числе проходов упрочняющего ролика $m = 1$ существенно не влияет на равномерность распределения йодидов железа по упрочненной поверхности детали. Увеличение числа проходов упрочняющего ролика $m > 2$ и давления его на обрабатываемую поверхность детали $p > 0,5$ МПа приводит к перенаклепу материала ПС при любых значениях скорости продольного перемещения стола станка $S_{пр}$.

Оценочным показателем целесообразности использования йодосодержащей смазочной композиции для создания на упрочняемых поверхностях ДМ нанослоев йодидов железа является период их сохраняемости $T_{сх}$, который зависит как от состава, структуры и толщины сформированного нанослоя, так и от условий эксплуатации деталей в узлах трения машин и механизмов. Проведены исследования зависимости периода сохраняемости нанослоев йодидов железа $T_{сх}$ на плоских поверхностях образцов из стали 12ХН3А, подвергнутых предварительной упрочняющей обработке обкаткой и последующему упрочнению роликом с нагружающим усилием $P = (735–986)$ Н, скоростью продольного перемещения стола $S_{пр} = (0,01–0,02)$ м/с, числом проходов упрочняющего ролика $m = 2$ и различным составом йодосодержащей смазочной композиции, от толщины нанослоя h_c , процентного содержания в нем йода, давления контртела q и скорости скольжения контактируемых поверхностей $V_{ск}$ при температуре в зоне контакта $\Theta = 25 \pm 5$ °С (табл. 4). Достижение периода сохраняемости нанослоя йодидов железа $T_{сх}$ фиксировалось резким возрастанием средней величины силы трения $(F_{тр})_{ср}$ и ее колебаний $\Delta F_{тр}$. Установлено, что наибольшее влияние на период сохра-

няемости нанослоев йодидов железа $T_{сх}$ оказывает толщина нанослоя h_c , процентное содержание в нем йода и давление контртела q , которые непосредственно воздействуют на адгезивно-когезионные связи в контактной зоне трибосистемы «образец – контртело».

Таблица 4

**Влияние состояния нанослоя йодидов железа и режимов трения
на период сохраняемости нанослоя $T_{сх}$**

№ эксп.	Состояние нанослоя йодидов железа		Режимы трения		Период сохраняемости нанослоя $T_{сх}$, мин
	h_c , нм	Содержание йода, %	q , МПа	$V_{ск}$, м/с	
1	30	3,52	0,1	0,05	25
2	40	4,03	0,2	0,05	32
3	40	4,01	0,2	0,08	34
4	30	3,37	0,2	0,05	20
5	50	4,26	0,1	0,05	30
6	40	4,05	0,3	0,08	28
7	25	2,95	0,2	0,05	16
8	40	4,08	0,3	0,10	27

Таким образом, результаты выполненных исследований показывают целесообразность применения йодосодержащей смазочной композиции при упрочняющей обработке ДМ для повышения их эксплуатационных свойств. При этом эффективность создаваемого на поверхности детали нанослоя йодидов железа зависит от многих факторов, основными из которых являются: способ предварительной обработки поверхности детали, толщина сформировавшегося нанослоя, процентное содержание в нем йода, а также режимы и условия эксплуатации детали в узле трения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бутенко, В.И. Эффективные технологии и процессы обработки деталей машин / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2025. – 320 с.
2. Бутенко, В.И. Отделочно-упрочняющая обработка деталей машин: технологии и их эффективность / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2022. – 220 с.
3. Латышев, В.Н. Повышение эффективности СОЖ / В.Н. Латышев. – Москва: Машиностроение, 1975. – 88 с.
4. Пат. № 76708 Российская Федерация, МПК G01B 7/06, G01R 27/16. Устройство для измерения толщины поверхностного токопроводящего слоя изделия / Бутенко В.И., Дуров Д.С., Гусакова Л.В.; заявл. 16.04.2008; опубл. 27.09.2008. – Бюл. № 27.
5. Пат. № 190964 Российская Федерация, МПК B24B 39/06. Устройство для упрочняющей обработки плоских поверхностей / Тамаркин М.А., Бутенко В.И., Тищенко Э.Э.; заявл. 22.03.2019; опубл. 17.07.2019. – Бюл. № 21.
6. Бутенко, В.И. Применение йода и его соединений в процессах обработки и эксплуатации деталей машин / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2023. – 242 с.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ПОРИСТОСТИ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

Глушечков В.А. , к.т.н., доцент, Землянкина А.В., студент

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
г. Самара, Российская Федерация
E-mail: imp@ssau.ru

Статья посвящена исследованиям возможности изменения под воздействием импульсного магнитного поля (ИМП) пористости металлопорошкового материала образцов, полученных с помощью аддитивной технологии лазерного сплавления. Под воздействием ИМП в образцах наводятся вихревые токи в десятки килоампер. Исследование пористости проведено с помощью компьютерной рентгеновской томографии. Установлен факт уменьшения объема пор в обработанных ИМП образцах в три раза по сравнению с необработанными. Предложен механизм схлопывания пор под действием температурных эффектов и электродинамических сил, вызванных протеканием в материале импульсных токов. Выдвинутые предположения подтверждены экспериментально: показано изменение формы пор и значений коэффициентов их сферичности. Полученные результаты могут быть одной из причин, объясняющей улучшение механических свойств металлопорошковых материалов под воздействием ИМП.

Ключевые слова: аддитивная технология, лазерное сплавление, металлопорошковая композиция, импульсное магнитное поле, вихревые токи, рентгеновская томография, пористость, механические свойства

POSSIBILITY OF CHANGING THE POROSITY OF METAL POWDER MATERIALS OF SAMPLES OBTAINED BY LASER MELTING

Glushchenkov V.A. , PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Zemlyankina A.V., student

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
Samara, Russian Federation
E-mail: imp@ssau.ru

The article is devoted to studies of the possibility of changing the porosity of metal-powder material of samples obtained using additive laser fusion technology under the influence of a pulsed magnetic field (IMF). Under the influence of an IMP, eddy currents of tens of kiloamps are induced in the samples. The porosity was examined using computed X-ray tomography. The fact of reducing the pore volume in the UTI-treated samples by three times compared with the untreated ones has been established. A mechanism for the collapse of pores under the influence of temperature effects and electrodynamic forces caused by the flow of pulsed currents in the material is proposed. The proposed assumptions have been confirmed experimentally: a change in the shape of the pores and the values of their sphericity coefficients has been shown. The results obtained may be one of the reasons explaining the increase in the mechanical properties of metal-powder materials under the influence of UTI.

Keywords: Additive technology, laser fusion, metal powder composition, pulsed magnetic field, eddy currents, X-ray tomography, porosity, mechanical properties

В статьях [1, 2] описан способ улучшения механических свойств материала образцов, полученных лазерным сплавлением металлопорошковой композиции (Al–Si). Суть нового способа – в бесконтактном воздействии на образцы импульсным магнитным полем [3]. При таком воздействии в образцах наводятся токи в десятки килоампер. Действие этих токов и приводит к изменению механических свойств (табл. 1). Найти причины, понять механизм такого изменения свойств является целью исследования, представленного в данной работе.

Изменение механических свойств материала образцов, подвергнутых воздействию ИМП

Амплитудные значения наведенных токов I , кА	Механические свойства		
	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %
Без воздействия ИМП	421	236	9,79
11,0	522	327	7,88
17,0	688	383	9,17
21,0	615	287	9,76

Высказано предположение, что одной из причин, объясняющей улучшение механических свойств порошкового материала под воздействием ИМП, является изменение пористости материала. Для проверки этого предположения плоские образцы из МПК (AL–Si) подвергнуты воздействию ИМП на трех режимах, обеспечивающих наведенный ток 11,0; 17,0 и 21,0 кА. Обработанные образцы были подвергнуты рентгеновской томографии [4].

На рис. 1 для примера приведены рентгенограммы исходного (необработанного) и обработанного (наведенный ток 21,0 кА) образцов с соответствующими гистограммами.

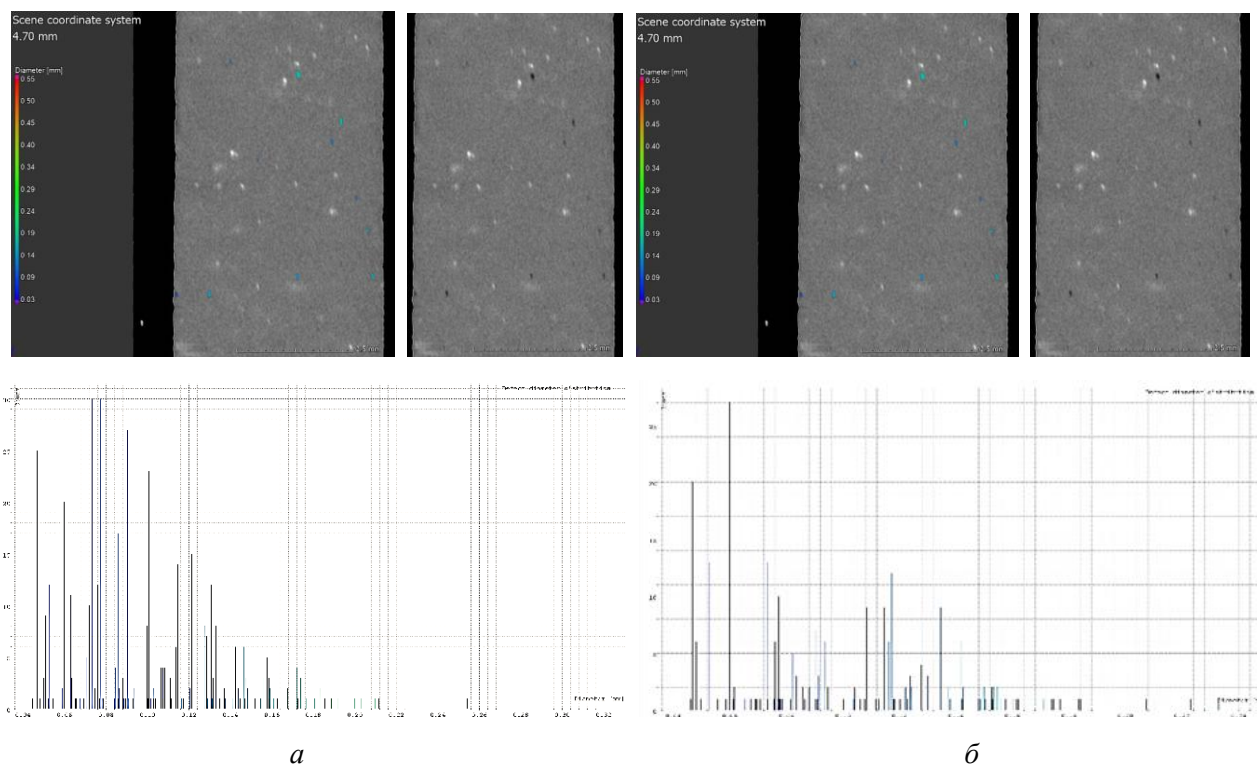


Рис. 1. Томограммы и гистограммы:
 а – исходного образца, не обработанного ИМП;
 б – образца, обработанного ИМП (наведенный ток $I = 21$ кА)

Результаты томографических исследований приведены в табл. 2.

Изменение пористости образцов после воздействия ИМП

Наведенный ток I , кА	Без обработки ИМП	11,0	17,0	21,0
Объемная доля пор, %	0,11	0,06	0,07	0,04

Из таблицы видно, что процентное содержание пор уменьшилось в три раза: с 0,11 до 0,04 % с увеличением наведенных токов с 11,0 до 21,0 кА. Произошло схлопывание части пор под воздействием вихревых токов.

Механизм воздействия наведенных токов на поры. Предложен механизм динамического схлопывания поры, который состоит в следующем. Наведенные токи обтекают пору. Рассмотрим два крайних случая ориентации вытянутой поры к направлению течения наведенного тока: продольное и поперечное. При продольном – по противоположным сторонам поры наведенные токи имеют параллельное направление (рис. 2, а), порождая, таким образом, возникновение электродинамических сил притяжения F – сил схлопывания. Процесс схлопывания облегчается значительным, вплоть до расплавления, разогревом металла вдоль поры вследствие большого количества выделившегося тепла $Q = f(Y^2)$. С учетом коэффициента термической диффузии и микросекундного временного диапазона протекания токов разогреву подвергаются тонкие слои металла, прилегающие к поре. Во втором случае, при поперечном расположении поры, по краям поры происходит концентрация тока с коэффициентом концентрации более 100 [3], что создает условие локального нагрева, микрооплавления материала и приводит к изменению формы поры, приближая ее к сферической за счет сил поверхностного натяжения (рис. 2, б).

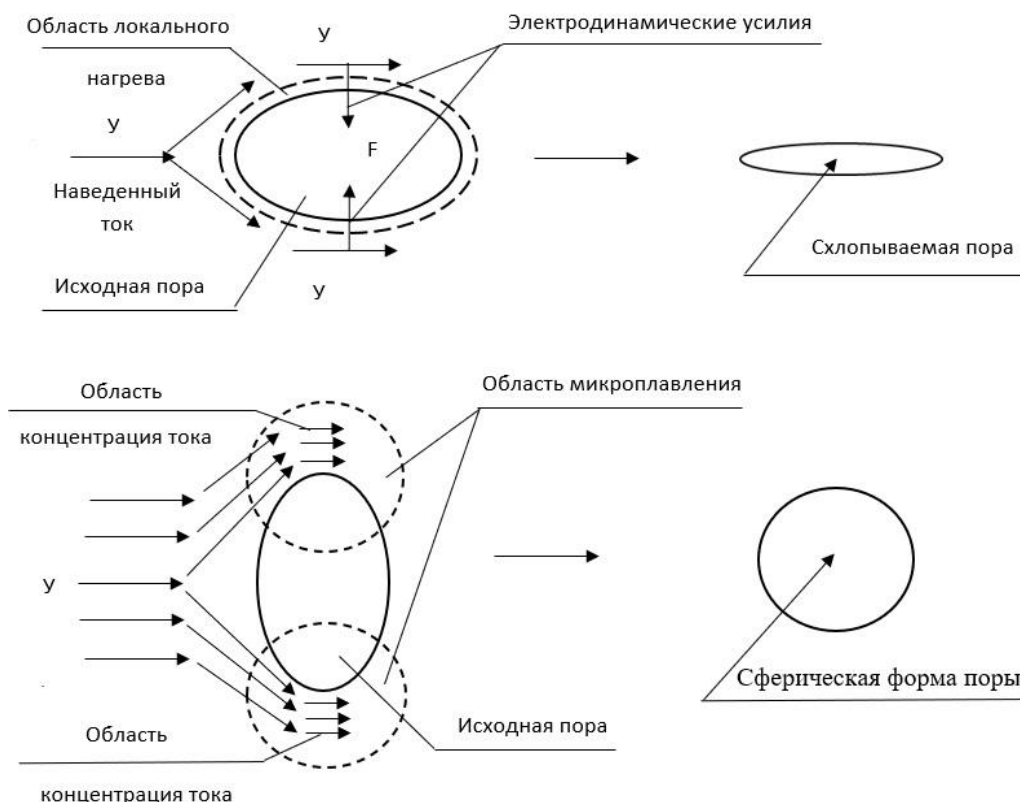


Рис. 2. Схема возникновения термических и электродинамических факторов воздействия

Таким образом, часть вытянутых пор с наиболее благоприятным расположением к направлению течения тока расплавляются и схлопываются, а часть меняет форму, приближаясь к сферической, о чем свидетельствуют результаты томографического анализа (рис. 3).

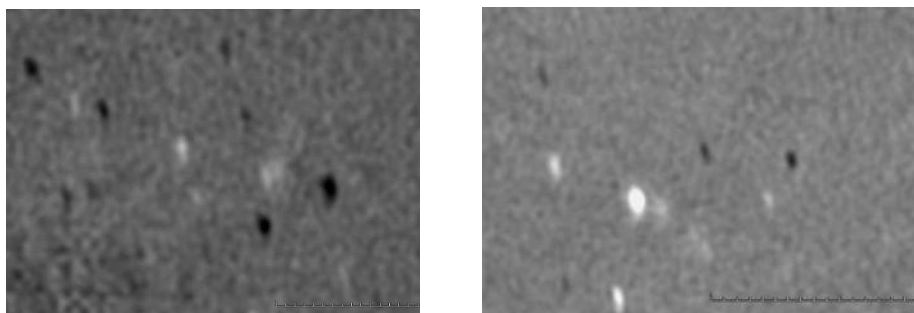


Рис. 3. Формы пор в исходном образце (а) и в образце, обработанном ИМП 21кА (б)

Экспериментально установлено, что обработка импульсным магнитным полем образцов, полученных лазерным сплавлением, приводит к значительному (в три раза) снижению пористости при возрастании значений наведенных токов до 21 кА. Механизм этого явления связан с совместным действием электродинамических сил сжатия и локального термического разогрева материала вблизи пор, вызывающих их схлопывание и сферизацию. Уменьшение количества и изменение формы пор являются одним из ключевых факторов, объясняющих наблюдаемое улучшение механических характеристик материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эффект пульсирующего магнитного поля на структуру и свойства сплава AlSi10Mg, полученного селективным лазерным сплавлением / В.А. Глушников, А.И. Хаймович, А.Г. Колмаков [и др.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2023. – Т. 2023, № 10. – С. 1458–1461.
2. Влияние импульсного магнитного поля на структуру и свойства пластин из сплава AlSi10Mg, полученных селективным лазерным сплавлением / В.А. Глушников, А.И. Хаймович, Т.С. Саргаева [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2023. – № 5. – С. 21–24.
3. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ): монография / А.Б. Прокофьев [и др.]. – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. – 140 с.
4. Демидов, А.А. Нетривиальные задачи, решаемые методом рентгеновской компьютерной томографии: доклад / А.А. Демидов, Е.И. Косарина // ТестМат: XVI Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов, 5 апреля 2024 г., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва. Секция 1: Математическое моделирование, автоматизация и цифровизация процессов неразрушающего контроля. – Москва, 2024.
5. Обзор исследований по залечиванию макротрещин в металлах под действием импульсного тока высокой плотности / В.А. Брызгалов, А.Ю. Моркина [и др.] // Material. Technologies. Desing. – 2024. – Т. 6, № 2 (17). – С. 38–58.
6. Финкель, В.М. О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока / В.М. Финкель, Ю.И. Головин, А.Н. Слетков // Доклады АН СССР. – 1916. – № 4. – С. 848–851.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫПЛАВЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИМЕРНОЙ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Григанов А.С.^{1,2✉}, инженер-технолог, **Мешков А.А.**¹, начальник бюро,
Баранов Д.А.¹, заместитель главного сварщика, **Жаткин С.С.**², к.т.н., доцент, профессор

¹ ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: ugs@uec-kuznetsov.ru

Представлена технология изготовления выплавляемых моделей для литейного производства с применением полимерной модельной оснастки. Описан способ изготовления полимерной модельной оснастки с применением аддитивных технологий. Проработан и откорректирован режим запрессовки модельной массы с учетом особенностей теплофизических характеристик материала полимерной модельной оснастки. Проведен анализ результатов проверки геометрии изготовленных выплавляемых моделей.

Ключевые слова: полимерная модельная оснастка, модели для литейного производства, аддитивные технологии, полимерные материалы, DLP 3D-печать

TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF SMELTED MODELS USING POLYMERMODEL TOOLING MANUFACTURED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

Griganov A.S.^{1,2✉}, process engineer, **Meshkov A.A.**¹, Head of the Bureau,
Baranov D.A.¹, Deputy Chief welding engineer,
Zhatkin S.S.², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Professor

¹ PJSC UEC-Kuznetsov, Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: ugs@uec-kuznetsov.ru

In the course of the work, the technology of production of smelted models for foundry production using polymer model tooling is presented. A method for manufacturing polymer model tooling using additive technologies is described. The pressing mode of the model mass has been worked out and adjusted, taking into account the peculiarities of the thermophysical characteristics of the polymer model tooling material. The analysis of the results of checking the geometry of the manufactured smelted models is carried out.

Keywords: polymer model tooling, models for foundry production, additive technologies, polymermaterials, DLP 3D printing

Опытное и экспериментальное производство обеспечивает процесс внедрения инноваций и новых технологий. Оно является ключевым фактором при переходе от научно-исследовательских разработок к технологической подготовке производства, позволяя изготавливать и проводить испытания прототипов, отрабатывать новые технологические процессы, прорабатывать возможность изготовления продукции в условиях, приближенных к серийному производству. Применение традиционных методов при производстве опытных изделий значительно увеличивает сроки изготовления деталей, что повышает трудоемкость технологических процессов, делая их более трудозатратными и дорогостоящими. По полученным данным [1–3], перевод определенного ряда технологических процессов с традиционного производства на аддитивное обеспечивает экономию времени на выполнение работ до 60 % [4].

Целью исследования является оптимизация производства при освоении новых изделий посредством внедрения современных технологических решений и использования аддитивных технологий, позволяющих снизить расходы опытного и экспериментального производства.

При отработке технологии изготовления литейных моделей изначально был выбран способ изготовления выжигаемых моделей методом DLP 3D-печати (Digital Light Printing – печать методом отверждения фотополимерной смолы ультрафиолетовым экраном/проектором). В процессе подбора режима и выращивания тестовых моделей выявлен существенный недостаток выжигаемой фотополимерной смолы, проявляющийся в недостаточном наборе жесткости и прочности в процессе фотополимеризации при выращивании крупногабаритных моделей с тонкой стенкой (1–3 мм). Выявленный недостаток негативно влияет на отклонения в геометрии изготавливаемых моделей, которые в данном случае варьируются в диапазоне 2–9 мм при номинальном значении в 0,4 мм. Результат проверки геометрии (*а*) и наглядное отклонение профиля модели от номинального положения (*б*) представлены на рис. 1. Также недостатком изготовленных выжигаемых моделей является высокий коэффициент термического линейного расширения (КТЛР), что приводит к разрушению керамических оболочковых форм на этапе выжигания моделей. Для предупреждения расширения выжигаемых моделей и разрушения керамических оболочковых форм проводится комплексная работа по апробированию способов упрочнения керамических форм.

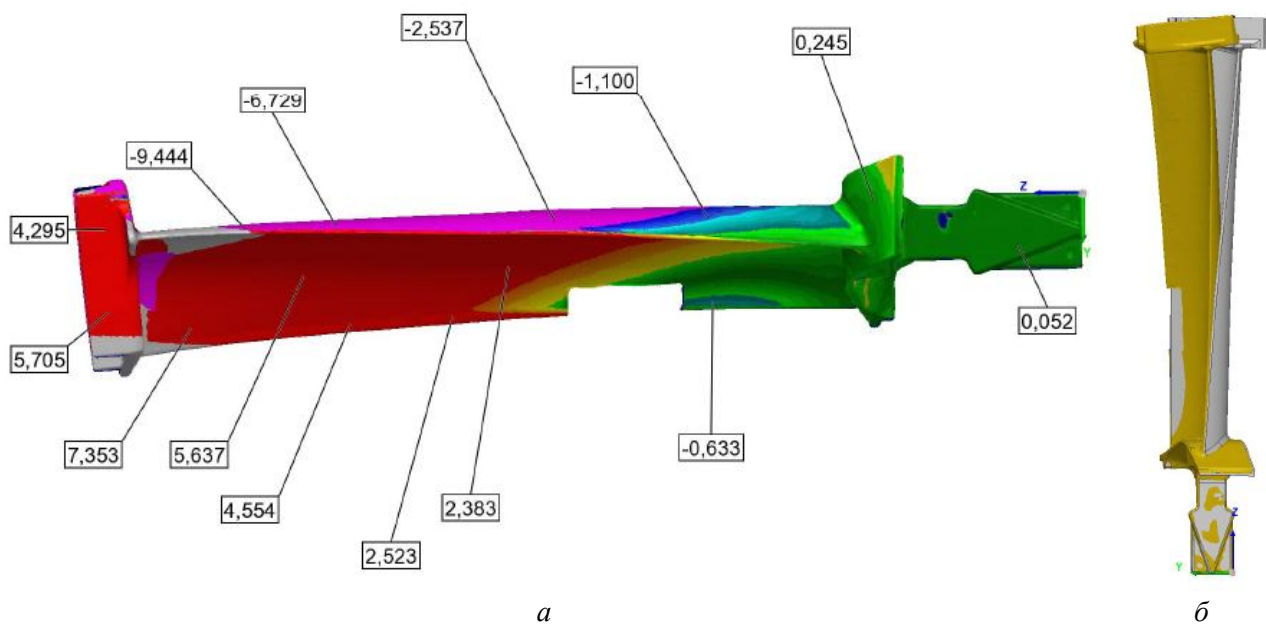


Рис. 1. Отклонения геометрии выжигаемой модели:
а – результат проверки геометрии,
б – наглядное отклонение профиля модели от номинального положения

В качестве эксперимента на основе электронно-геометрической модели (ЭГМ) серийной пресс-формы спроектирована и изготовлена полимерная модельная оснастка (рис. 2), состоящая из формообразующего вкладыша и корпуса [5–7]. Формообразующий вкладыш изготовлен на DLP 3D-принтере из фотополимерной смолы, корпус полимерной модельной оснастки выполнен на FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование методом послойного наплавления материала) 3D-принтере из материала Pet-G (полиэтилентерефталат-гликоль).

Запрессовка модельной массы ППК (парафин, полиэтиленовый воск, канифоль) в полимерную оснастку производилась с помощью реечного пресса, состав модельной массы ППК указан в таблице.

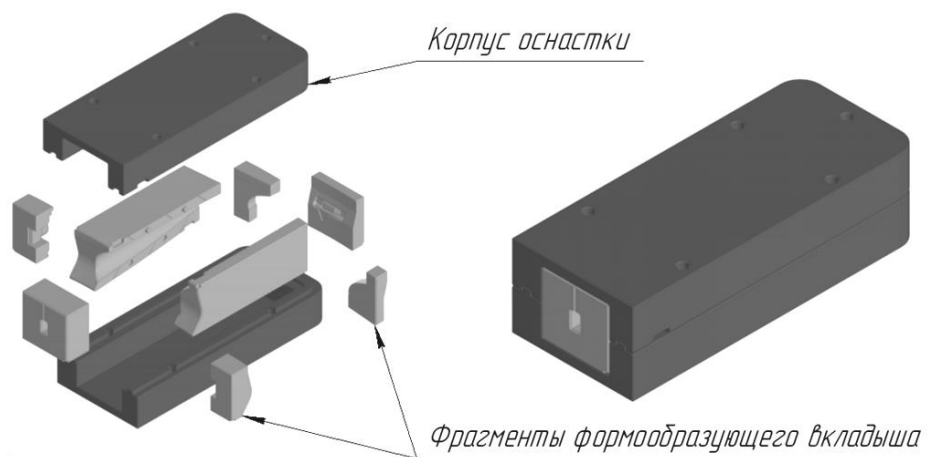


Рис. 2. ЭГМ полимерной модельной оснастки:
а – корпус и фрагменты формообразующего вкладыша модельной оснастки,
б – оснастка в сборе

Состав модельной массы ППК

Исходный компонент	Содержание компонента, %
Канифоль	$40 \pm 0,2$
Церезин	$4 \pm 0,2$
Парафин	$40 \pm 0,2$
Полиэтиленовый воск	$16 \pm 0,2$

В процессе отработки технологии запрессовки модельной массы в полимерную модельную оснастку изготовлено более 20 выплавляемых моделей. При запрессовке выявлены дефекты в виде спаев, несплошностей и непроливов в тонких участках моделей. Образование данных дефектов связано с низкой температурой при запрессовке модельной массы и невысокой теплопроводностью материала формообразующего вкладыша полимерной модельной оснастки. Исправление возникших дефектов было реализовано с помощью оперативного внесения изменений в конструкцию формообразующего вкладыша, а именно добавления каналов диаметром до 1,5 мм для выхода воздуха из формообразующего вкладыша и внесения корректировок в температурный режим запрессовки модельной массы. Фрагмент формообразующего вкладыша до (*а*) и после (*б*) добавления каналов для выхода воздуха представлен на рис. 3.

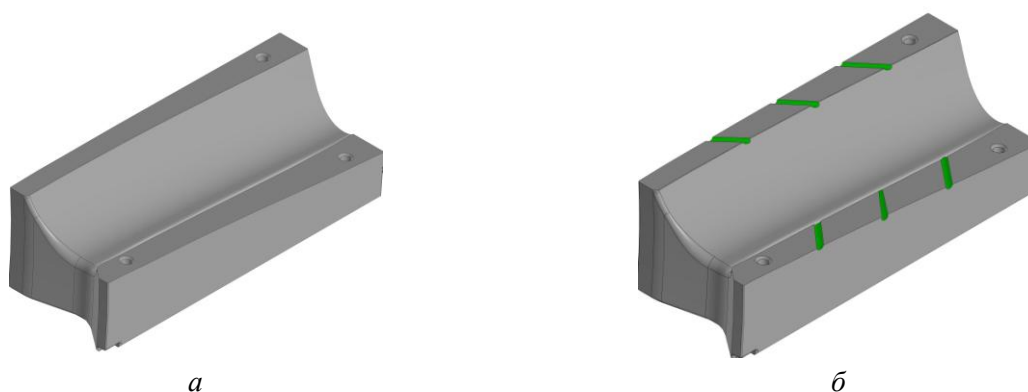


Рис. 3. Схематичное изображение каналов для выхода воздуха на фрагменте оснастки:
а – фрагмент без каналов, *б* – фрагмент с каналами для выхода воздуха

Анализ геометрии (рис. 4) показал, что модели, изготовленные с помощью полимерной модельной оснастки, имеют незначительные отклонения геометрии профиля от номинального положения в диапазоне от 0,015 до 0,349 мм.

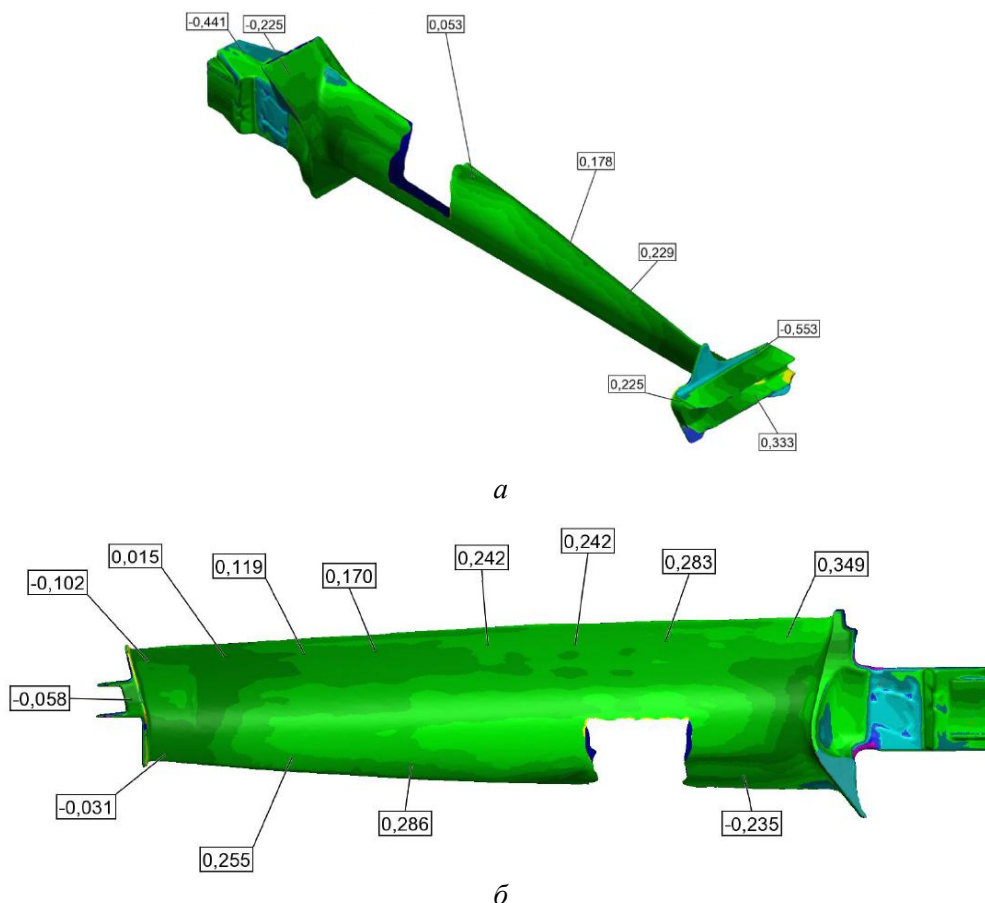


Рис. 4. Результат проверки геометрии модели,
изготовленной с помощью полимерной модельной оснастки:
а – изометрия, б – вид спереди

Изготовленные восковые модели собраны в модельные блоки с литниково-питающей системой (ЛПС) по технологии, представленной в пособии [8, 9]. Произведен процесс формирования керамической оболочковой формы путем обсыпки пылевидным кварцем и погружением обсыпанных форм в жидкое связующее с последующим чередованием обсыпки и нанесением связующего для образования многослойной оболочковой формы по технологии [10]. Осуществлен процесс выплавления модельной массы из керамических оболочковых форм в бойлерклаве по технологии, описанной в патенте [11]. В результате получены оболочковые формы без трещин и поверхностных дефектов.

Следует понимать, что использование полимерной модельной оснастки не может полностью заменить традиционные способы изготовления моделей для литейного производства, например, крупной серии моделей, а позволяет сократить экономические и трудовые затраты при опытно и экспериментальном производстве, когда необходимо изготавливать небольшие партии моделей с возможностью быстрого изменения их конфигурации.

Результатом проделанной работы является сравнительный анализ проверки геометрии выплавляемых моделей, изготовленных с применением полимерной модельной оснастки, который показал, что величина отклонений изготовленных моделей сопоставима с требованиями нормативной документации. Также в ходе отработки технологии установлено, что применение аддитивных технологий при изготовлении модельной оснастки позволяет сократить сроки на технологическую подготовку производства на 1–2 месяца по сравнению с традиционными способами изготовления оснастки, а также дает возможность оперативно вносить изменения в конструкцию фрагментов оснастки с минимальными трудовыми и экономическими затратами на изготовление и доработку. Стоимость изготовления полимерной модельной оснастки составляет порядка 2 % от стоимости изготовления металлической модельной оснастки для производства выплавляемых моделей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Environmental and economic implications of distributed additive manufacturing: The case of injection mold tooling / R. Huang, M.E. Riddle, D. Graziano [et al.] // *Journal of Industrial Ecology*. – 2017. – 21 (S1). – Pp. 130–140.
2. Трофимова, Н.Н. Аддитивное производство как инновационная технология цифровой трансформации промышленных предприятий / Н.Н. Трофимова; под ред. И.М. Степанова, Ю.А. Ковальчук // *Приоритеты новой экономики: энергопереход 4.0 и цифровая трансформация: Сборник тезисов всероссийской научно-практической конференции*. – Москва: Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации, 2022. – С. 451–544. – EDN UERVUV.
3. Berman, B. 3-D printing: The new industrial revolution / B. Berman // *Business Horizons*. – 2012. – Vol. 55 (2). – Pp. 155–162.
4. Абрамов, И.В. Проблемы и перспективы цифровизации промышленных предприятий с использованием аддитивных технологий / И.В. Абрамов // *Вестник евразийской науки*. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 4–8.
5. Арташов, А.Д. Пособие по конструированию изделий, изготавливаемых по технологии FDM: учебное пособие / А.Д. Арташов, А.Д. Талыгин. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 121 с.
6. Валетов, В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учебное пособие / В.А. Валетов. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
7. Беляев, Л.В. Введение в аддитивные технологии: учебное пособие / Л.В. Беляев, А.В. Аборкин. – Владимир: Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2023. – 248 с.
8. Литье по выплавляемым моделям / Под ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. – Москва: Машиностроение, 1984. – С. 175.
9. Неверов, А.Н. Технология конструкционных материалов. В 4 ч. Ч. 2. Литейное производство: учебно-методическое пособие / А.Н. Неверов, О.В. Селиверстова. – Москва: МАДИ, 2021. – 76 с.
10. Инновации в литье по выплавляемым моделям / К.В. Никитин [и др.]. – Самара: СамНЦ РАН, 2017. – 144 с.
11. Пат. РФ № 2772536 С1. Способ удаления модельного блока из керамической формы в литье по выплавляемым моделям / Шилов А.В., опубл. 23.05.2022.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ЛИТОЙ СТАЛИ 20ГМЛ

Грищенко Е.Р. , магистрант, **Лупанов Р.М.**, магистрант, **Бануляк А.В.**, магистрант, **Кривенков А.О.**, доцент, к.т.н., доцент

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация
E-mail: egrsamsung@gmail.com

Систематизированы и проанализированы данные открытых научных источников, посвященные влиянию различных видов термической обработки на микроструктуру, механические свойства и, в частности, ударную вязкость низколегированной литой стали марки 20ГМЛ.

Ключевые слова: сталь 20ГМЛ, термическая обработка, ударная вязкость, механические свойства, микроструктура, литье, отпуск, закалка

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE PROPERTIES OF CAST STEEL 20G

Grishchenko E.R. , Master's Degree student, **Lupanov R.M.**, Master's Degree student, **Banulyak A.V.**, Master's Degree student, **Krivenkov A.O.**, Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Penza State University, Penza, Russian Federation
E-mail: egrsamsung@gmail.com

This review article systematizes and analyzes data from open scientific sources on the effect of various types of heat treatment on the microstructure, mechanical properties and, in particular, the impact strength of low-alloy cast steel grade 20GML.

Keywords: 20GML steel, heat treatment, impact strength, mechanical properties, microstructure, casting, tempering, quenching

Сталь марки 20ГМЛ относится к классу низколегированных конструкционных сталей и широко применяется для изготовления ответственных крупногабаритных отливок в таких областях, как тяжелое и энергетическое машиностроение (корпусы турбин, детали прокатного оборудования, элементы рам) [1, 2]. Ключевыми требованиями к таким изделиям являются достаточная прочность, хорошая свариваемость и, что особенно важно, высокое сопротивление динамическим и ударным нагрузкам, характеризующееся ударной вязкостью (KCV, KCU).

Исходная литая структура стали 20ГМЛ, однако, часто не позволяет достичь требуемого уровня свойств. Для нее характерны макро- и микрогетерогенность (дендритная ликвация), крупное неоднородное зерно, наличие грубых пластинчатых карбидов и значительные остаточные напряжения [3]. Эти факторы негативно сказываются на пластичности и вязкости материала, делая его склонным к хрупкому разрушению.

Термическая обработка (ТО) является обязательным и решающим технологическим этапом, направленным на устранение пороков литой структуры и придание металлу необходимого комплекса эксплуатационных характеристик. Выбор оптимального режима ТО требует глубокого понимания фазовых и структурных превращений, происходящих в стали 20ГМЛ при нагреве и охлаждении. Целью данного обзора является систематизация современных представлений о влиянии основных видов термической обработки – отжига, нормализации, закалки с отпуском – на микроструктуру и свойства этой стали на основе анализа данных, представленных в научной литературе.

Анализ литературных данных [1, 3, 4] позволяет выделить характерные структурные изменения, происходящие в стали 20ГМЛ при применении стандартных режимов ТО. Отжиг (нагрев до 900–920 °С с последующим медленным охлаждением) проводится для снятия внутренних напряжений, гомогенизации химического состава и улучшения обрабатываемости. В результате формируется равновесная феррито-перлитная структура. Однако, как отмечается в работах [3, 5], перлитная составляющая часто сохраняет грубопластинчатый характер, а зерно феррита может оставаться крупным, что ограничивает повышение ударной вязкости. Нормализация (нагрев до 880–910 °С с охлаждением на спокойном воздухе) считается одним из наиболее эффективных методов для литых сталей. Основное ее назначение – измельчение зерна аустенита и, как следствие, получение более мелкой и однородной феррито-перлитной структуры по всему сечению отливки. Исследования [4, 6] показывают, что нормализация приводит к значительному увеличению ударной вязкости по сравнению с литым или отожженным состоянием за счет устранения крупных колоний перлита и дендритной неоднородности.

Закалка с отпуском (улучшение) представляет собой наиболее радикальный способ упрочнения. Закалка с температур 850–880 °С (обычно в масле) обеспечивает превращение аустенита в мартенсит. Последующий высокий отпуск (при 550–650 °С) является ключевым этапом, определяющим конечные свойства. В ходе отпуска происходит распад мартенсита с образованием структуры сорбита отпуска – высокодисперсной смеси феррита и сфероидальных карбидов [2, 7]. Именно сфероидизация карбидов и очистка границ зерен от их сплошных сеток являются, согласно данным [5, 8], основными факторами, обеспечивающими максимальный уровень ударной вязкости при сохранении высокой прочности. Закалка с низким отпуском (200–300 °С) применяется, когда требуется достичь максимальной твердости и прочности. Структура представляет собой отпущенный мартенсит (троостит отпуска). Несмотря на высокую прочность, литературные источники [7, 9] указывают на более низкую ударную вязкость такого состояния по сравнению с улучшенным, что связывают с остаточными напряжениями и менее стабильной карбидной фазой. Обобщение результатов исследований [1, 4, 6, 9], позволяет привести диапазон механических свойств стали 20ГМЛ после различных видов ТО (см. таблицу).

Типичные механические свойства стали 20ГМЛ после различных видов термической обработки (по данным литературы)

Режимы термической обработки	Предел прочности, σ_B (МПа)	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ (МПа)	Относительное удлинение, δ (%)	Ударная вязкость, КСЧ (Дж/см ²)
Литое состояние	400–480	220–280	18–25	25–40
Отжиг	420–500	250–300	22–28	40–60
Нормализация	500–600	320–380	20–26	60–90
Закалка+отпуск 600 °С	700–800	600–700	15–20	100–130
Закалка+отпуск 200 °С	800–950	700–850	9–14	70–100

Проведенный анализ позволяет четко проследить корреляцию между видом ТО, формируемой микроструктурой и комплексом свойств.

1. Оптимум ударной вязкости после закалки и высокого отпуска объясняется комплексом микроструктурных факторов: высокой дисперсностью и сфероидальной формой карбидов, которые не являются концентраторами напряжений; мелким зерном феррита; отсутствием хрупких сеток по границам зерен. Фрактографические исследования, описанные в работах [5, 8], подтверждают, что излом в этом состоянии имеет вязкий ямочный характер.

2. Высокая прочность после низкого отпуска достигается за счет тетрагональности мартенситной решетки и дисперсного упрочнения карбидами выделения. Однако, как отмечается в [7, 9], игольчатая морфология структуры и наличие остаточных напряжений способствуют более легкому зарождению и распространению трещин, что снижает сопротивление хрупкому разрушению. Излом часто имеет смешанный характер с участками скола.

3. Нормализация представляет собой эффективный компромиссный вариант, обеспечивающий существенное улучшение свойств по сравнению с литым состоянием без необходимости закалки, что может быть экономически и технологически целесообразно для ряда ненагруженных деталей сложной конфигурации.

На основе обзора литературных данных можно сформулировать следующие выводы и рекомендации для промышленного применения:

1. Для достижения наилучшего сочетания прочности и ударной вязкости ответственных литых деталей из стали 20ГМЛ, работающих в условиях динамических и ударных нагрузок, рекомендуется применять режим закалки с высоким отпуском (улучшение). Этот режим обеспечивает формирование структуры сорбита, гарантирующей высокое сопротивление хрупкому разрушению.

2. Режим закалки с низким отпуском следует применять в тех случаях, когда на первое место выходит требование к максимальной поверхностной твердости и износостойкости, а требования по ударной вязкости являются второстепенными.

3. Нормализация является эффективным и часто достаточным видом ТО для деталей, не испытывающих предельных динамических нагрузок, а также может использоваться в качестве предварительной обработки перед закалкой для измельчения исходной литой структуры.

4. Перспективными направлениями дальнейших исследований, как следует из анализа литературы, являются: изучение влияния изотермической закалки (аустемперинг) на структуру и свойства 20ГМЛ; оптимизация режимов ТО с учетом массивности отливки для минимизации градиента свойств по сечению; применение компьютерного моделирования (JMatPro, Thermo-Calc) для прогнозирования кинетики фазовых превращений и свойств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев. – Москва: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – Москва: Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Колобнев, И.Ф. Термическая обработка сталей в машиностроении: справочник / И.Ф. Колобнев. – Москва: Машиностроение, 1976. – 359 с.
4. Мозберг, Р.К. Материаловедение: учебник для вузов / Р.К. Мозберг. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Академия, 2014. – 448 с.
5. Смирнов, М.А. Влияние режимов отпуска на ударную вязкость низколегированных литейных сталей / М.А. Смирнов, В.И. Потапов // Литейное производство. – 2018. – № 5. – С. 28–32.
6. Бернштейн, М.Л. Структура и механические свойства металлов / М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. – Москва: Металлургия, 1970. – 496 с.
7. Богатырев, И.В. Микроструктура и свойства стали после закалки и отпуска / И.В. Богатырев, О.С. Комаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – № 12. – С. 15–20.
8. Фрактографический анализ изломов стальных отливок: монография / Под ред. В.С. Ивановой. – Санкт-Петербург: Политехника, 2009. – 210 с.
9. Обзор свойств конструкционных литейных сталей / НИИМаш. – Москва, 2020. – 45 с.

ВЛИЯНИЕ ХЛОРИД-ИОНОВ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ Cr-Mn АУСТЕНИТНЫХ НЕМАГНИТНЫХ СПЛАВОВ

Елагина О.Ю., д.т.н., профессор, Танасенко М.С. ✉, ассистент

РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация
E-mail: tanasenko.m@gubkin.pro

Представлены результаты влияния хлорид-ионов различных химических соединений на коррозионную стойкость немагнитных аустенитных сплавов на Cr-Mn-основе. Выявлен наиболее коррозионно-активный агент, используемый для приготовления бурового раствора.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, хлорид-ионы, профилометрия, коррозия, немагнитные сплавы

EFFECT OF CHLORIDE IONS ON THE CORROSION RESISTANCE OF Cr-Mn AUSTENITIC NONMAGNETIC ALLOYS

Elagina O.Yu., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Tanasenko M.S. ✉, assistant

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
Moscow, Russian Federation
E-mail: tanasenko.m@gubkin.pro

The results of the effect of chloride ions of various chemical compounds on the corrosion resistance of non-magnetic austenitic Cr-Mn-based alloys are presented. The most corrosive agent used for the preparation of drilling mud has been identified.

Keywords: corrosion resistance, chloride ions, profilometry, corrosion, non-magnetic alloys

Современное строительство скважин основано на наклонно направленном и горизонтальном бурении и для измерения направления бурения применяют различных датчики, основанные на LWD (Logging While Drilling) и MWD (Measurement While Drilling) технологиях. Данные технологии передают всю информацию в режиме реального времени от забоя скважины к устью с помощью гидравлических каналов телесистемы [1–3]. Принципиальная схема КНБК представлена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема компоновки низа буровой колонны

Элементы, входящие в состав телесистемы, входят в компоновку низа буровой колонны (далее – КНБК), и для их корректной работы необходимо обеспечить низкую магнитную проницаемость металла, несущих конструкций, в противном случае возникают большие погрешности при измерении направления ствола скважины [4–6].

Для обеспечения низкой магнитной проницаемости корпусных элементов применяют немагнитные сплавы, в состав которых входят следующие химические элементы: Cr (более 18 %), Mn (более 18 %), Ni (от 3 %), обеспечивающие низкую магнитную проницаемость сплава. Также по причине высокого содержания легирующих элементов данные сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью и высокими механическими свойствами.

В процессе бурения скважины неотъемлемой частью являются буровые растворы, с помощью которых происходит удаление выбуренной породы, охлаждение бурового инструмента, стабилизация стенок скважины и т. д.

Для обеспечения требуемых характеристик в состав бурового раствора добавляют хлористые соли на основе натрия, калия и кальция.

Хлорид-ионы, содержащиеся в значительном количестве в водной части бурового раствора, вступают во взаимодействие с поверхностью немагнитной стали и способствуют разрушению пассивационной пленки, сформированной на основе оксидов хрома. Такое взаимодействие приводит к снижению коррозионной стойкости указанных сплавов и развитию питтинговой коррозии. Целью данной работы является исследование влияния различных хлоридных солей на коррозионную стойкость немагнитных аустенитных сплавов на Cr-Mn основе.

В качестве исследуемого материала взят сплав с химическим составом, представленным в таблице.

Химический состав немагнитного сплава

Химический состав, %								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
0,02	0,09	20,15	0,016	0,003	18,90	1,76	3,51	0,63

Перед началом исследования проводились замеры исходной шероховатости поверхности на профилометре MahrSurf XR 20. Исследование коррозионной стойкости проводилось при температуре 70 °С в трех различных солевых растворах (NaCl, KCl и CaCl₂) с концентрацией хлоридов 120 г/л. Первая группа образцов помещалась в растворы, контактирующие с атмосферой, а вторая группа выдерживалась в растворах после деаэрации азотом. Продолжительность испытаний составило 240 часов.

Результаты исследований приведены на рис. 2.

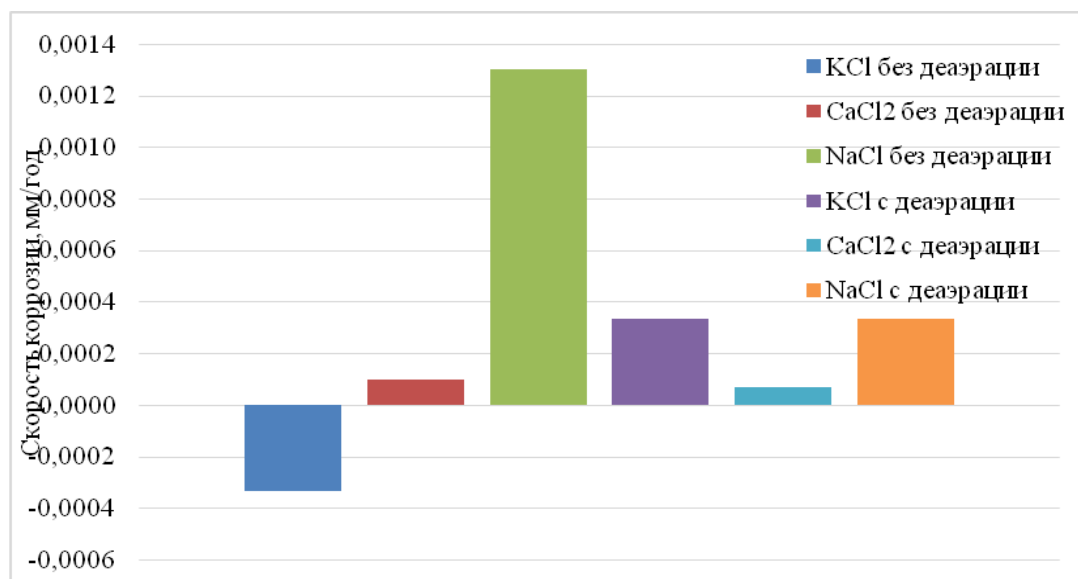


Рис. 2. Сравнение скорости коррозии немагнитного сплава

При отсутствии деаэрации наибольшую скорость коррозии исследованная сталь показала в растворе с NaCl. У раствора с CaCl₂ скорость коррозии оказалась в 13 раз меньше. Раствор с KCl показал привес массы, что указывает на образование прочной пленки, которую не удалось удалить стандартной механической очисткой.

Деаэрация привела к снижению скорости коррозии образцов в растворах с NaCl на 53 % и CaCl₂ на 33 %. В растворах с KCl при отсутствии кислорода наблюдается развитие коррозионных процессов с потерей массы и ростом скорости коррозии до 0,0005 мм/год. Сопоставление активности коррозии в солевых растворах при их деаэрации показало, что максимальную скорость коррозии сохранил раствор с NaCl. По сравнению с ним раствор с KCl показал скорость коррозии на 46 % ниже, а минимальные значения показал раствор с CaCl₂, активность которого составила только 11 % от скорости коррозии в растворе NaCl.

Коррозионные поражения образцов после выдержки представлены на рис. 3.

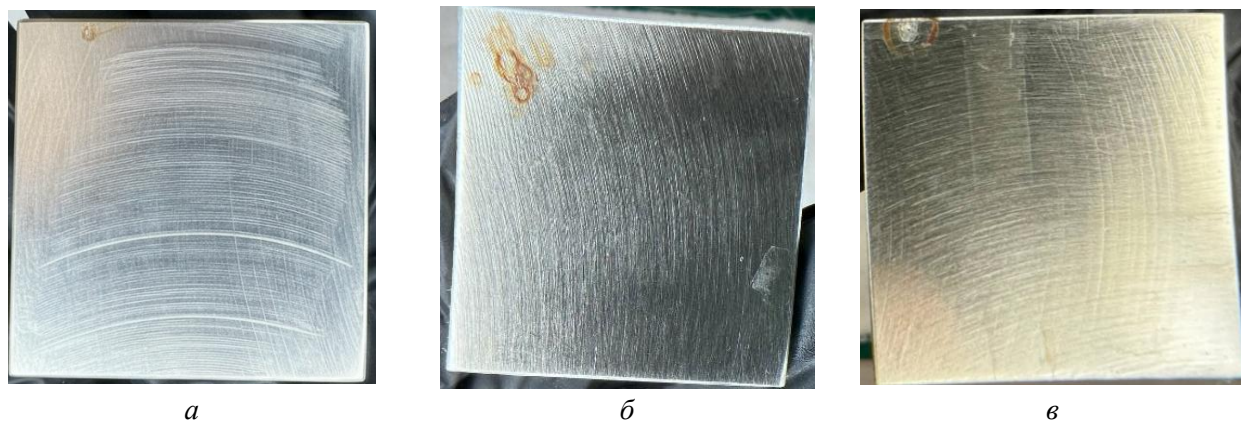


Рис. 3. Фотографии коррозионных поражений образцов после выдержки:
а – в растворе KCl; б – в растворе CaCl₂; в – в растворе NaCl

Как видно из рис. 3, на всех образцах присутствуют следы локальных коррозионных поражений с преимущественно краевым эффектом.

Для контроля состояния поверхности образцов после выдержки проведена профилометрия с определением показателей шероховатости. Результаты профилометрии после выдержки образцов немагнитного сплава приведены на рис. 4.

При отсутствии деаэрации наибольшую локальную скорость коррозии показал раствор CaCl₂, который вызвал наиболее выраженное изменение шероховатости поверхности.

Образцы после выдержки в растворе NaCl также обнаружили прирост показателей шероховатости, которая, однако, на 25 % меньше, чем в растворе CaCl₂.

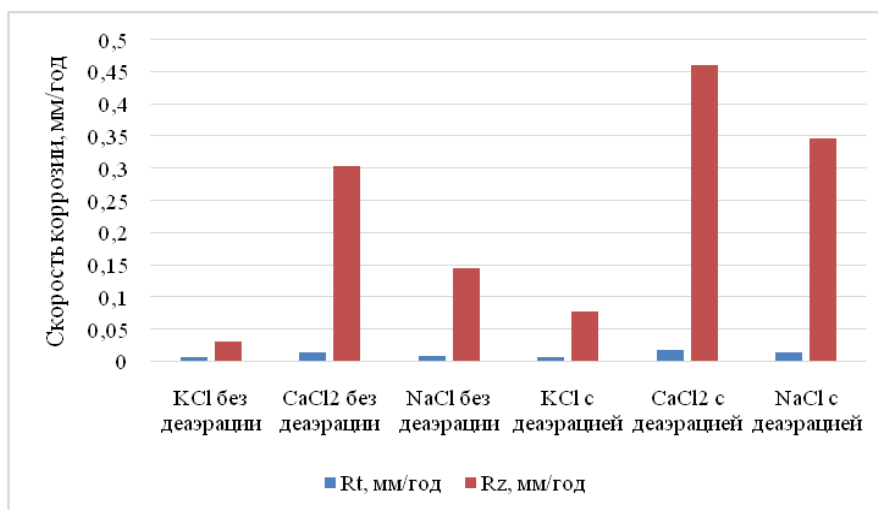


Рис. 4. Сравнение локальной коррозии немагнитного сплава

Наименьшее изменение шероховатости показали образцы после выдержки в растворе KCl, параметры шероховатости которых возросли на 65 % по R_t и 97 % по R_z .

Сравнение результатов замеров образцов после выдержки без деаэрации с результатами, полученными в растворах с деаэрацией, свидетельствует об увеличении шероховатости образцов во всех трех солевых растворах. Это указывает на развитие склонности к формированию локализованной коррозии при отсутствии кислорода в составе бурового раствора. В общем, прирост шероховатости составил от 2,16 раза в растворе CaCl_2 , до 2,02 раза в растворе KCl.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшей коррозионной активностью обладают хлорид-ионы, содержащиеся в соединениях хлористого натрия, они активно разрушают пассивную пленку немагнитного сплава и способствуют росту скорости коррозии.

2. Хлорид-ионы, содержащиеся в соединении хлористого кальция, способствуют локальному разрушению пассивной пленки и наиболее активно взаимодействуют с поверхности сплава при отсутствии кислорода в водном растворе.

3. Хлорид-ионы из калиевых солей практически не наносят ущерб немагнитным сплавам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Novel non-magnetic steel for high-performance drilling and logging operations / P.V. Bravkov, O.V. Zhdaneev, R.Z. Gusmanov, A.L. Sapunov // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – Vol. 21. – Pp. 52–57. – URL: <https://doi.org/10.17580/cisisr.2021.01.09>
2. Немагнитка «Мотовилихи» готова к испытаниям [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rudmet.ru/news/11048/> (дата обращения: 13.01.2026).
3. Работа буровой колонны в скважине [Электронный ресурс]. – URL: <https://ppt-online.org/551072> (дата обращения: 13.01.2026).
4. Geomagnetic referencing – the real-time compass for directional drillers / A. Buchanan, C. Finn, J.J. Love [et al.] // Oilfield Review. – 2013. – Vol. 25. – No. 3. – Pp. 32–47.
5. Биндер, Я.И. Результаты испытаний инклинометра с компенсацией магнитных помех, установленного в непосредственной близости от забойного двигателя при малых зенитных углах наклона скважины / Я.И. Биндер, П.А. Ключкин, А.Г. Тихонов // Каротажник. – 2013. – № 6 (228). – С. 86–91.
6. Пат. № 2290673 С2 Российская Федерация, МПК G01V 3/40. Способ измерения магнитного азимута в скважинном инклинометре (варианты) и устройство для их осуществления: № 2005107601/28: заявл. 10.03.2005; опубл. 27.12.2006 / Биндер Я.И., Вольфсон Г.Б., Гаспаров П.М. [и др.]; заявитель: Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», Открытое акционерное общество «Электромеханика».

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ МАРКИ 12Х18Н10Т
ПРИ НАПЛАВКЕ НА ЖАРОПРОЧНУЮ МАРТЕНСИТНУЮ СТАЛЬ
МАРКИ 13Х14Н3В2ФР-Ш**

Илларионов Д.В.^{1,2✉}, инженер-технолог, **Мешков А.А.**¹, начальник бюро,
Исаев С.Л.¹, главный сварщик, **Негодяев В.О.**^{1,2}, начальник бюро, **Тимошкин И.Ю.**², доцент

¹ ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: ugs@uec-kuznetsov.ru

Представлены результаты исследований наплавленных образцов, полученных из металлопорошковой композиции марки 12Х18Н10Т на подложном материале из сплава 13Х14Н3В2ФР-Ш. Рассмотрены особенности формирования структуры и механических свойств образцов в зависимости от изменения параметров процесса прямой лазерной наплавки. Определены рациональные технологические режимы прямой лазерной наплавки, реализуемые на роботизированной установке прямого лазерного выращивания.

Ключевые слова: прямая лазерная наплавка, металлопорошковая композиция, жаропрочные стали, микроструктура, погонная энергия

**FEATURES OF STRUCTURE AND PROPERTIES FORMATION
OF A METAL POWDER COMPOSITION OF GRADE 12Cr18Ni10Ti
DURING CLADDING ON HEAT-RESISTANT MARTENSITIC STEEL GRADE
13Cr14Ni3W2VNB (ESP).**

Illarionov D.V.^{1, 2✉}, process engineer, **Meshkov A.A.**¹, Head of the Bureau,
Isaev S.L.¹, Chief welding engineer, **Negodyaev V.O.**^{1,2}, Head of the Bureau,
Timoshkin I.Yu.², Associate Professor

¹ PJSC UEC-Kuznetsov, Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: ugs@uec-kuznetsov.ru

The results of investigations of deposited specimens produced from a metal powder composition of grade 12Cr18Ni10Ti on a substrate made of 13Cr14Ni3W2VNB (ESP) alloy are presented. The features of structure formation and mechanical properties of the specimens depending on variations in the parameters of the direct laser deposition process are analyzed. Rational technological parameters of direct laser deposition implemented on a robotic direct laser manufacturing system are determined.

Keywords: direct laser deposition, metal powder composition, powder, microanalysis, microstructure

Прямая порошковая лазерная наплавка (ПЛН) является ремонтной технологией восстановления геометрии крупногабаритных изделий с возможностью оперативного управления параметрами процесса [1]. По сравнению с другими методами ремонта деталей газотурбинных двигателей ПЛН характеризуется низким уровнем остаточных напряжений, высокой воспроизводимостью и прецизионной точностью формообразования. Процесс осуществляется посредством подачи металлопорошковой композиции в зону расплава, создаваемую сфокусированным лазерным излучением, с последующей кристаллизацией расплава и образованием наплавленного валика [4].

В качестве наплавляемых материалов все более широко применяются коррозионно-стойкие аустенитные стали, используемые в авиа- и двигателестроении для работы при тем-

пературах до 500 °С, циклических тепловых нагрузках и в агрессивных средах [5], что обусловлено их высокой коррозионной стойкостью, технологической пластичностью и хорошей свариваемостью.

Сталь 13X14H3B2ФР-Ш применяется для изготовления ответственных деталей ГТД, однако серийный металлопорошковый материал на ее основе отсутствует. В связи с этим использован МПК марки 12X18H10Т, близкий по химическому составу, который обладает высокой свариваемостью, пластичностью и ударной вязкостью и характеризуется стабильными поставками [6].

Целью настоящей работы является оценка эффективности восстановления деталей газотурбинных двигателей из стали 13X14H3B2ФР-Ш методом наплавки МПК марки 12X18H10Т.

Методика исследований и материалы

Подложки изготавливались из прутка стали 13X14H3B2ФР-Ш (табл. 1) по ГОСТ 5632-72 [7] диаметром 38 мм, перекованного в лист толщиной 6 мм. Для снятия внутренних напряжений проведена термическая обработка в вакуумной печи: нормализация при 1040 ± 10 °С (30 мин) с охлаждением в вакууме и высокий отпуск при 680 ± 10 °С (60 мин) с охлаждением на воздухе. После термообработки лист разрезался на образцы размером $70 \times 30 \times 6$ мм.

Таблица 1

Химический состав МПК 12X18H10Т (ТУ-1-595-16-1983-2021) и материала подложки

Сплав	Элементы, %													
	Fe	Cr	Ni	C	Cu	W	V	Mo	Mn	Ti	Si	P	S	B
МПК 12X18H10Т	основа	17–19	9–11	не более										
				0,12	0,4	0,2	0,2	0,5	2	0,8	0,8	0,035	0,035	–
Подложка 13X14H3B2ФР-Ш	основа	13–15	2,8–3,4	0,1–0,16	не более									
					–	1,6–2,2	0,18–0,28	–	0,6	0,05	0,6	0,03	0,02	0,04

Для исследования микроструктуры и механических свойств наплавка выполнялась на образцы-пластины в шести режимах (табл. 2), выбранных на основе рекомендаций производителя установки и ранее выполненных исследований [10].

Таблица 2

Режимы прямой лазерной наплавки

Параметр режима лазерной наплавки	Значение параметра лазерной наплавки					
Режим, №	1–1	3–1	1–2	3–2	1–3	3–3
Погонная энергия, Дж/мм	80	93	60	70	48	56
Расход МПК, г/мин:						
Первый валик	6,5		8,7		10,9	
Внутренний валик	5,2		7		8,7	
Последний валик	6,3		8,4		10,7	
Шаг слоя h_1 , мм	0,4					
Ширина валика, мм	2,58					
Диаметр лазерного пятна, мм	2,5					
Расход газа на наплавочном сопле, л/мин	10					
Расход транспортирующего газа, л/мин	5					
Расход газа для обдува защитного стекла, л/мин	7					
Длительность паузы между треками, с	30					

ПЛН осуществлялась с формированием наплавленных валиков размерами $25 \times 2,5 \times 0,4$ мм, при этом габаритные размеры наплавленного образца составляли $50 \times 5 \times 5,2$.

Образцы травили в реактиве «А» (соляная кислота, медный купорос, вода) и исследовали с помощью электронного микроскопа.

Результаты и обсуждения

Визуальный анализ качества наплавки показал отсутствие дефектов. Из-за послойного метода наплавки на боковых поверхностях имеются наплывы.

Измерения микротвердости проводились по ГОСТ 9450-76 [11] методом Виккерса (HV_{0,05}) при нагрузке 0,05 кг по высоте зоны наплавки. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений микротвердости по высоте зоны наплавки и основного материала

№ образца	1–1	1–2	1–3	3–1	3–2	3–3
Погонная энергия, Дж/мм	80	60	48	93	70	56
Микротвердость наплавленного материала HV _{0,05}	252–259	246–251	258–259	252–259	252–259	252–256
Микротвердость основного материала	565–580	570–575	533–542	511–519	528–542	524–537

Установлено, что при увеличении погонной энергии лазерного излучения от 48 до 93 Дж/мм значения микротвердости наплавленного материала находятся в диапазоне HV_{0,05} = 246–259 что соответствует справочным данным.

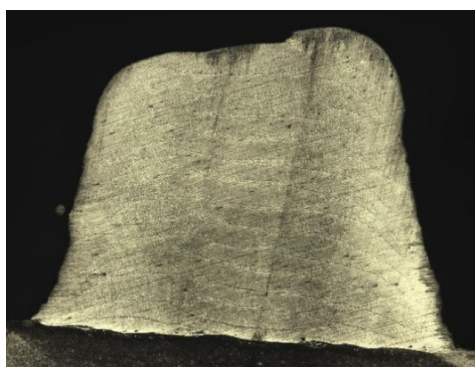
Анализ дефектов (пор) и их количества на 1 см² (табл. 4) показал, что во всех исследуемых образцах присутствуют микропоры. При снижении погонной энергии наблюдается уменьшение их количества, что, вероятно, связано с тем, что при повышенном тепловложении ванна расплава становится более глубокой, усиливается турбулентность расплава, что способствует активному захвату газов и влаги из окружающей атмосферы [13]. В структуре образца № 3–1 обнаружено повышенное количество пор.

Таблица 4

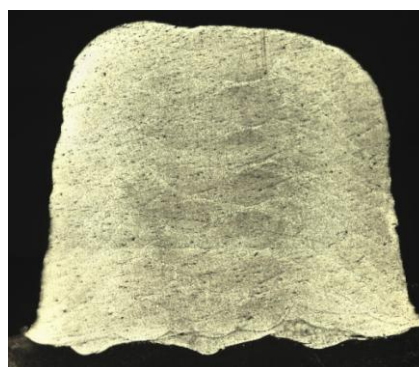
Внутренние дефекты в материале

№ образца	Погонная энергия, Дж/мм	Количество пор на 1 см ² (N _п), шт.
№ 3–1	93	24
№ 1–1	80	10
№ 3–2	70	7
№ 1–2	60	5
№ 3–3	56	4
№ 1–3	48	3

Исследование макроструктуры показало, что в зоне термического влияния на всех образцах отсутствуют дефекты, такие как трещины и несплавления (рис. 1). Глубина внедрения наплавки в основной материал пластины составляет 0,10–0,25 мм.



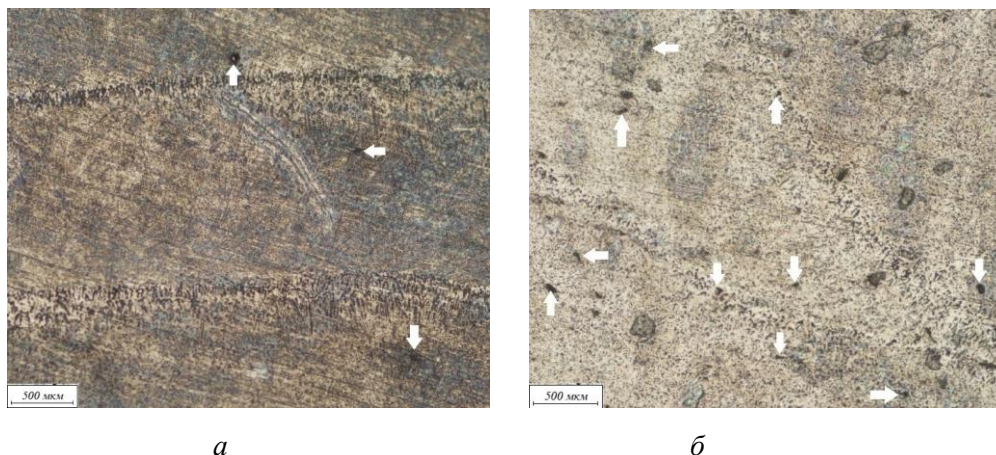
а



б

Рис. 1. Макроструктура образцов:
а – образец № 1–3, б – образец № 3–1, ×14

Исследование микроструктуры (рис. 2) показало, что образование пор в основном происходит внутри наплавленных валиков.



a

б

Рис. 2. Микроструктура образцов:
а – образец № 1–3, б – образец № 3–1, $\times 200$

Выводы и заключения

В диапазоне погонной энергии 48–93 Дж/мм процесс прямой порошковой лазерной наплавки МПК 12Х18Н10Т на подложку из стали 13Х14Н3В2ФР-Ш характеризуется высокой стабильностью, что проявляется в устойчивом формировании наплавленных валиков и отсутствии несплавов и трещин. Изменение погонной энергии в исследуемом диапазоне не приводит к значимым изменениям микротвердости и макроструктуры наплавленного слоя.

Во всех режимах формируется однородная аустенитная структура с близкими значениями микротвердости. Обнаруженная дисперсная микропористость равномерно распределена по сечению образцов и не оказывает существенного влияния на механические свойства, однако с увеличением погонной энергии наблюдается рост количества микропор, максимальный – при 93 Дж/мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Analysis of single tracks of IN718 produced by laser powder directed energy deposition process / G. Piscopo; E. Atzeni; S. Biamino [et al.] // *Procedia CIRP*. – 2022. – 112. – Pp. 340–345 [Google Scholar] [CrossRef].
2. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair / A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese [et al.] // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9. – Art. 3316.
3. Piscopo, G. A Hybrid Modeling of the Physics-Driven Evolution of Material Addition and Track Generation in Laser Powder Directed Energy Deposition / G. Piscopo, E. Atzeni, A. Salmi // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – Art. 2819.
4. Исследование структуры наплавленного материала из жаропрочного хромоникелевого сплава и апробация метода прямой лазерной наплавки при ремонте вала компрессора высокого давления / В.О. Негодяев, Д.А. Баранов, С.С. Жаткин, К.В. Никитин // *Цветные металлы*. – 2025. – № 7. – С. 71–77.
5. Исследование основных параметров исходной металлопорошковой композиции и оценка влияния структурной наследственности на формируемую структуру наплавки / В.О. Негодяев, Р.Ю. Селемев, С.С. Жаткин [и др.] // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. – 2025. – № 3 (53). – С. 63–72. – URL: [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-63-72](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-63-72)
6. Абраимов, Н.В. *Авиационное материаловедение и технология обработки* / Н.В. Абраимов, Ю.С. Селисеев, В.В. Крымов; под ред. Н.В. Абраимова. – Москва: Высшая школа, 1998. – 444 с.
7. Проскуряков, В.И. Разработка технологии тонкослойного лазерного легирования хромоникелевой стали 12Х18Н10Т / В.И. Проскуряков, И.В. Родионов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2022. – № 3. – С. 85–96.

8. ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. – Москва: Издательство стандартов, 1972.
9. Влияние интенсивности лазерного излучения на микроструктуру суперсплава INCONEL 718, изготовленного методом прямого энергетического осаждения / А.А. Мешков, В.О. Негодяев, Е.А. Мешкова, А.И. Хаймович // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – Вып. 11.
10. ТУ-1-595-16-1983-2021. Металлопорошковая композиция стали марки 12X18H10T.
11. ASM Handbook, Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. – Классический справочник по проблемам горячих трещин, зон термического влияния и остаточных напряжений в нержавеющей сталях. – 1993. – С. 1094–1102.
12. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Введ. 1977-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 1993.
13. Еремицкая, К.Е. Исследование влияния параметров режима наплавления на твердость стали 12X18H10T после прямого лазерного выращивания / К.Е. Еремицкая, Е.А. Носова, А.В. Балякин // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2025. – № 2. – С. 44–51.
14. Pore evolution mechanisms during directed energy deposition additive manufacturing / K. Yu, X. Zhou, Y. Huang [et al.] // Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 78. – Art. 103824.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ TiC–Cu, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВС-ИНФИЛЬТРАЦИИ, ОТ МАРКИ УГЛЕРОДА

Каракич Е.А. ✉, аспирант, **Умеров Э.Р.**, к.т.н., **Амосов А.П.**, профессор, д.ф.-м.н., профессор, **Кадымов Ш.А.**, аспирант, **Ибатуллин И.Д.**, д.т.н., профессор

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: maximcaracki4@gmail.com

Представлены результаты влияния марки углерода в СВС-шихте при синтезе композитов состава TiC–Cu на механические и триботехнические свойства композита, полученного методом СВС-инфильтрации. Отмечено снижение момента трения при введении в СВС-шихту частиц графита.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, металлотермия, трение

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF TiC–Cu COMPOSITES OBTAINED BY SHS-INFILTRATION ON THE CARBON TYPE

Каракич Е.А. ✉, PhD student, **Умеров Э.Р.**, PhD in Engineering Sciences, **Амосов А.П.**, Professor, Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor, **Кадымов Ш.А.**, PhD student, **Ибатуллин И.Д.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: maximcaracki4@gmail.com

The results of the influence of the carbon grade in the SHS charge during the synthesis of composites of the TiC–Cu composition on the mechanical and tribotechnical properties of the composite obtained by the SHS-infiltration method are presented. The reduction of the friction torque when introducing graphite particles into the SHS charge is noted.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, metallothermy, friction

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к разработке высокопрочных материалов, обладающих при этом высокой тепло- и электропроводностью и способных работать в условиях повышенного трения. Перспективными для изучения являются композитные материалы, сочетающие в своем составе твердую керамическую часть и тепло- и электропроводящий металл. Одной из главных проблем при получении таких материалов остается слабая адгезия между металлической матрицей и смазывающими включениями, что ограничивает показатели эксплуатационных характеристик. Предлагаемый подход базируется на использовании самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) керамического каркаса с последующей самопроизвольной инфильтрацией расплавом металла.

Важным моментом межфазного взаимодействия является присутствие одной из составляющих кермета в процессе его синтеза в жидком состоянии, что требует учитывать такие физические явления, как смачиваемость твердой фазы жидкой фазой, а также поверхностная энергия системы фаз. Смачиваемость характеризуется соотношением когезионных сил в жидкости и адгезионных сил притяжения молекул жидкости к молекулам твердой фазы [1]. Отмечается, что наиболее прочная связь керамической и металлической фаз в керметах достигается за счет смачивания и частичного растворения при краевом угле смачивания менее 90°, а также слабых химических реакций на границе фаз с образованием промежуточных химических соединений [2].

Образцы для данной работы синтезировались методом сочетания технологии СВС и металлотермии открытым методом без применения специального тигля для протекания металлотермитной реакции $3\text{CuO} + 2\text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Cu}$, фазоразделения оксидного и медного расплавов, выпуска расплава меди вниз после проплавления тонкой стальной шайбы [3]. Общая схема эксперимента представлена на рис. 1.

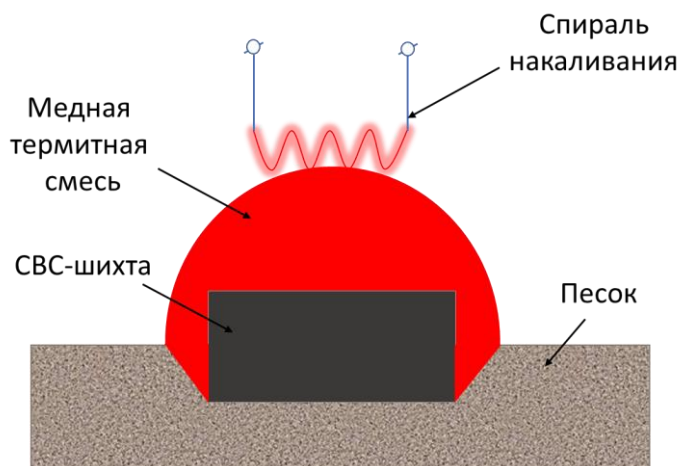


Рис. 1. Схема сочетания реакции металлотермии и СВС для получения керамико-металлических композитов

Спрессованная в виде цилиндрического брикета СВС-шихта укладывалась в лунку из песка и сверху равномерно обсыпалась медной термитной смесью. Электрическая спираль нагрева инициировала реакцию медного термита, от теплового импульса которой запускалась реакция СВС. В процессе горения медной термитной смеси и образования расплава меди достигается достаточная температура для инициирования СВС-реакции образования пористого каркаса TiC , который моментально начинает пропитываться поступающим расплавом меди за счет капиллярного эффекта. В результате синтеза и самопроизвольной инфильтрации расплава меди в каркас TiC были получены плотные твердые образцы керметов TiC-Cu .

Триботехнические испытания керметов проводили в лаборатории наноструктурированных поверхностей СамГТУ с использованием универсального триботехнического комплекса «Универсал-1Б».

Технические характеристики трибометра:

- 1) схемы испытания: кольцо-плоскость (торцевой трибометр), кольцо-кольцо, четырех-шариковая схема;
- 2) виды трения: смешанное, граничное, сухое;
- 3) виды изнашивания: абразивное, усталостное, при схватывании, фреттинг, контактная усталость;
- 4) нормальная нагрузка: 1,5–200 кгс (давление 1–130 МПа);
- 5) частота вращения: 600–1750 мин⁻¹;
- 6) регистрация данных: автоматизированная регистрация температуры саморазогрева, момента трения (Н·м), нормальной нагрузки (Н).

Испытания проводили на специально разработанной машине электротрения с испытательным узлом, с характеристиками:

- схема трения «два пальца – диск»;
- частота вращения диска – 600 об/мин;
- усилие прижима пальцев – 1 Н;
- диаметры пальцев из испытываемых материалов – 5 мм;
- длительность испытаний – 30 мин;
- электрический ток, пропускаемый через пальцы при трении – 2,5 А;
- привод вращения – патрон токарного станка.

Данные эпюр трения образцов с сажей в составе представлены на рис. 2, 3, 4, 5.

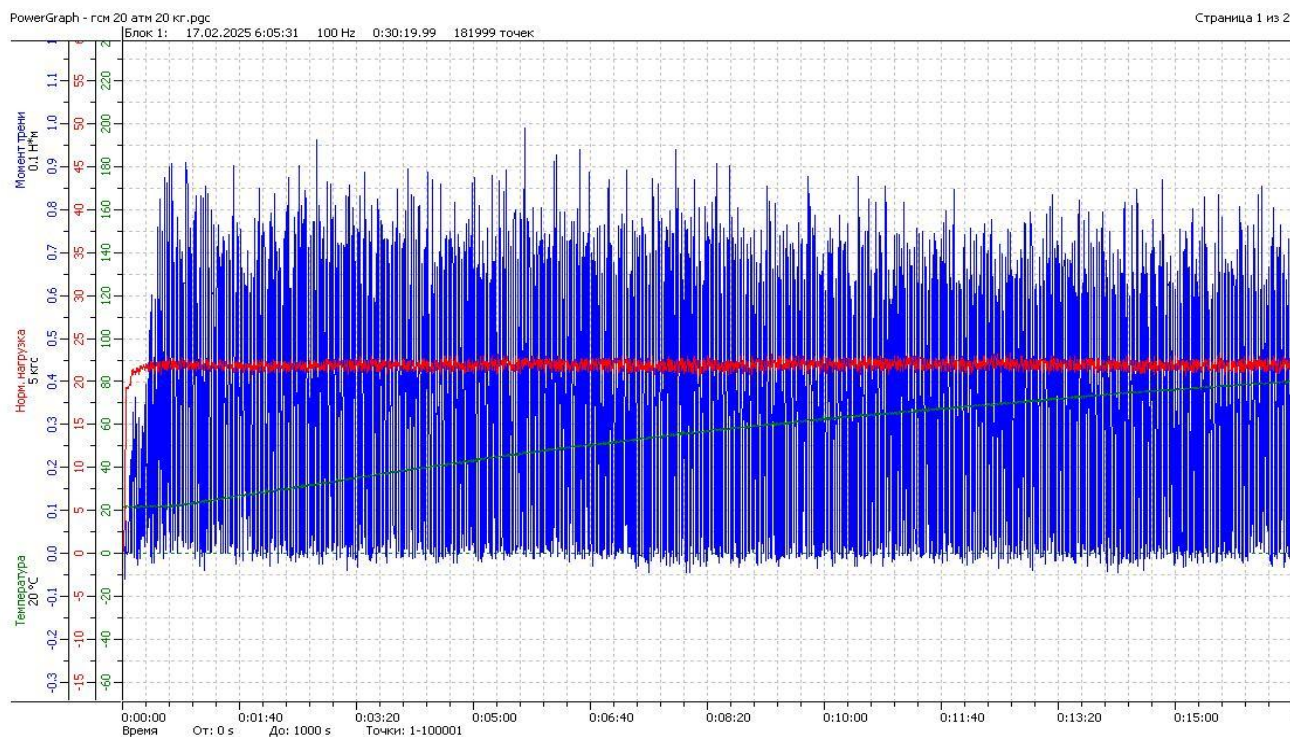


Рис. 2. Эпюры изнашивания образца TiC (П701)-Cu без добавки меди

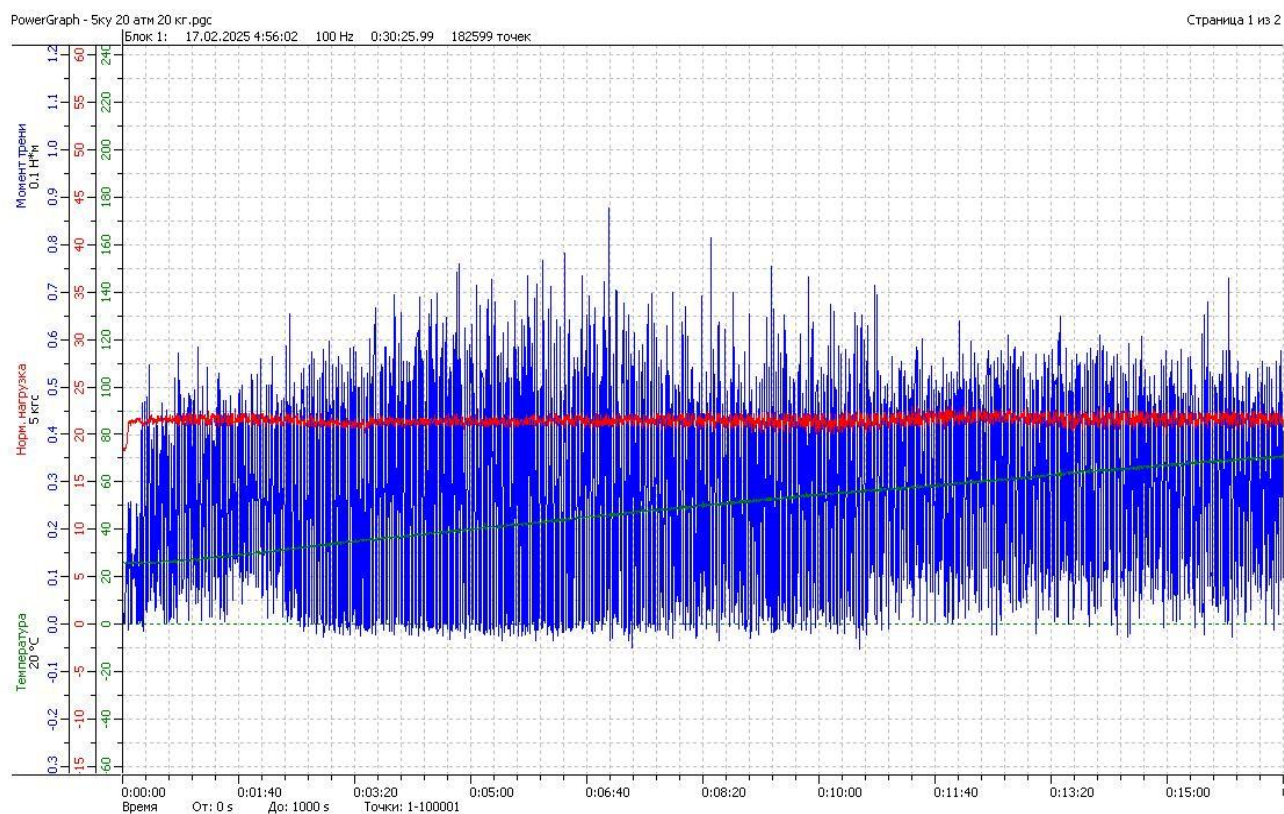


Рис. 3. Эпюры, полученные при изнашивании образца TiC (П701)-5 % Cu

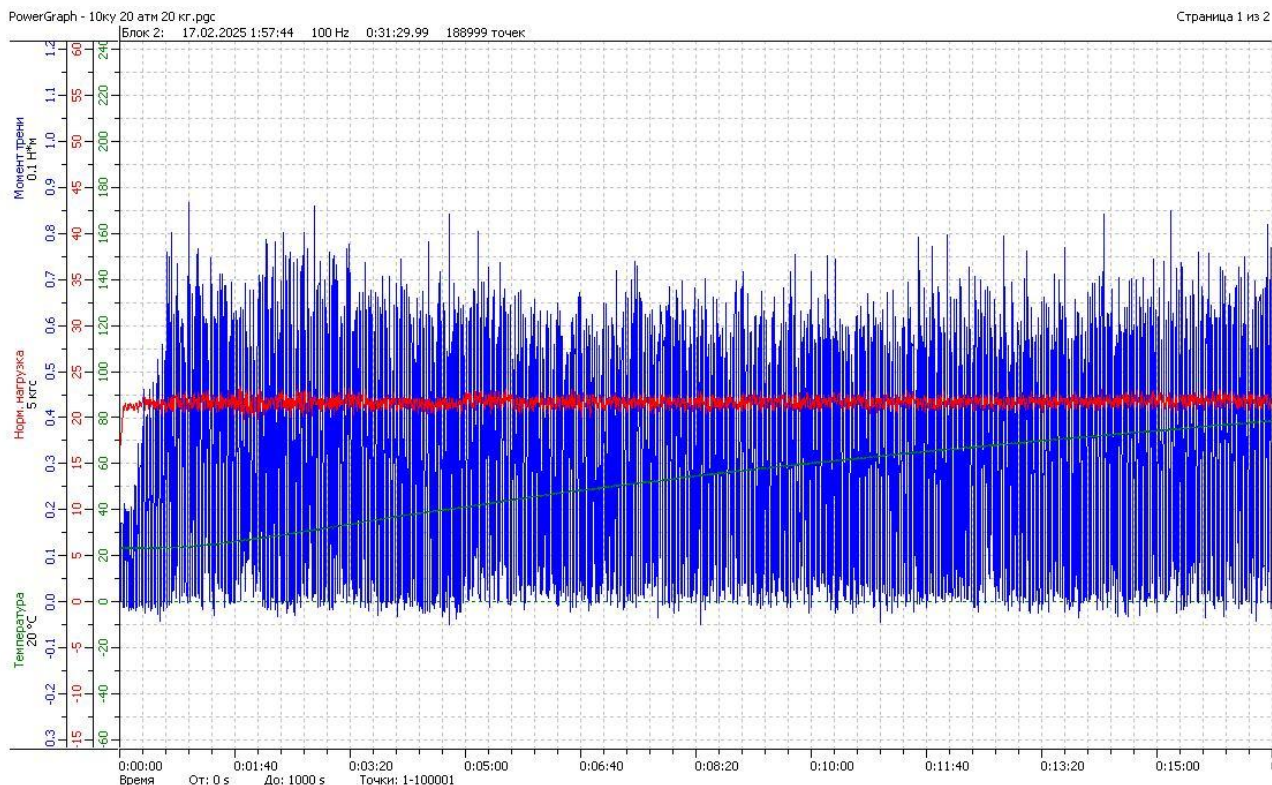


Рис. 4. Эпюры, полученные при изнашивании образца TiC (П701)-10 % Cu

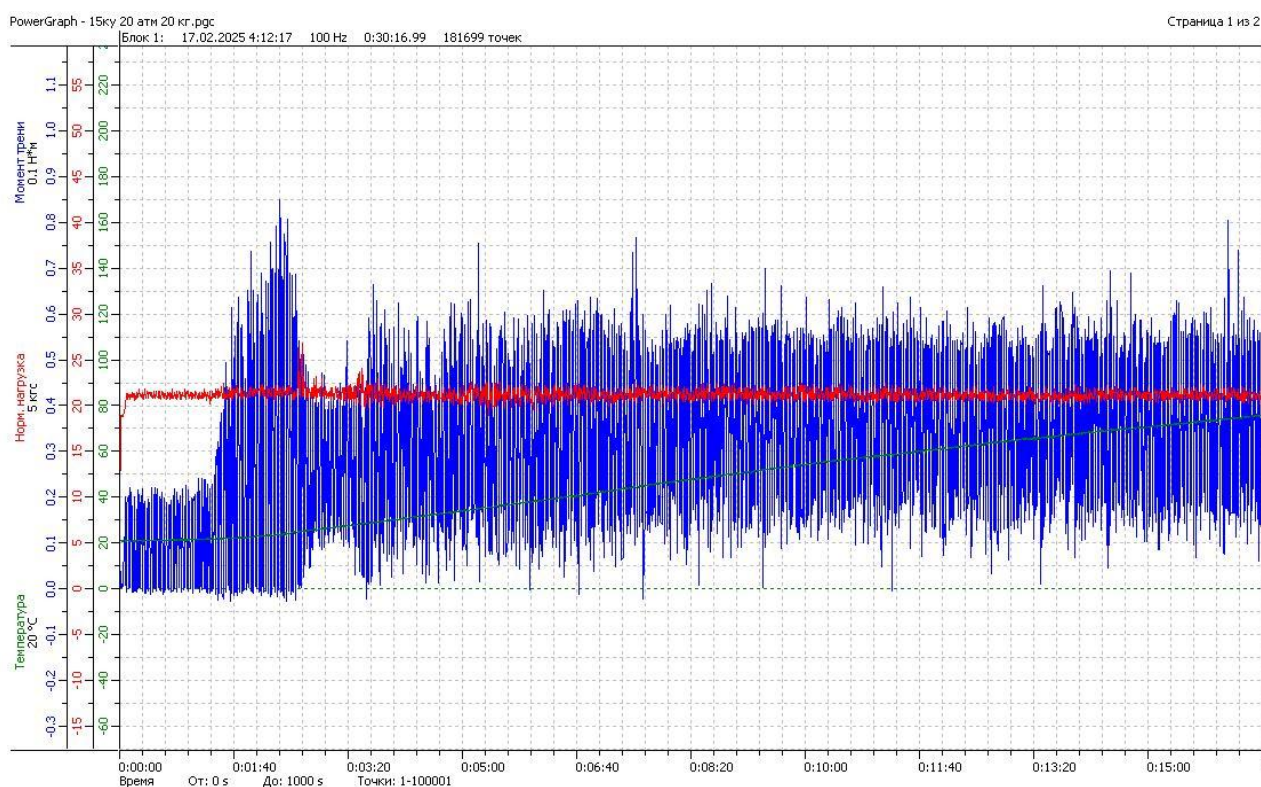


Рис. 5. Эпюры, полученные при изнашивании образца TiC (П701)-15 % Cu

Эпюры момента трения показывают, что трение осуществлялось за счет непрерывного процесса микрорезания поверхности (выраженное абразивное изнашивание). После испытаний каждого образца около зоны трения скапливался (горкой) достаточно большой объем частиц износа. Эти частицы обладают магнитными свойствами. Отсюда следует, что изнашивалось в основном стальное контртело. Исследование показало, что поверхность образцов

при трении легко царапает стекло и стальные поверхности. Фактически образцы представляют собой абразивные материалы. Износ образцов с сажей при испытаниях составил: TiC-Cu – 83 мкм; TiC-5 % Cu – 10 мкм; TiC-10 % Cu – 58 мкм; TiC-15 % Cu – 120 мкм (рис. 6).

По уровню износа и эпюре нагружения лучшие характеристики показал образец с 5 % добавкой меди, исходя из этого замена углерода на графит марки C2 производилась в композите такого же состава.

Снижение нагрузки на трущийся контакт до 1 МПа в целом привело к снижению интенсивности изнашивания образцов. Однако по эпюре момента трения видно, что уменьшение силы прижатия образца и контробразца привело к возникновению автоколебаний (скачкообразное движение). При этом на поверхности трения контртела признаки абразивного изнашивания отсутствуют.

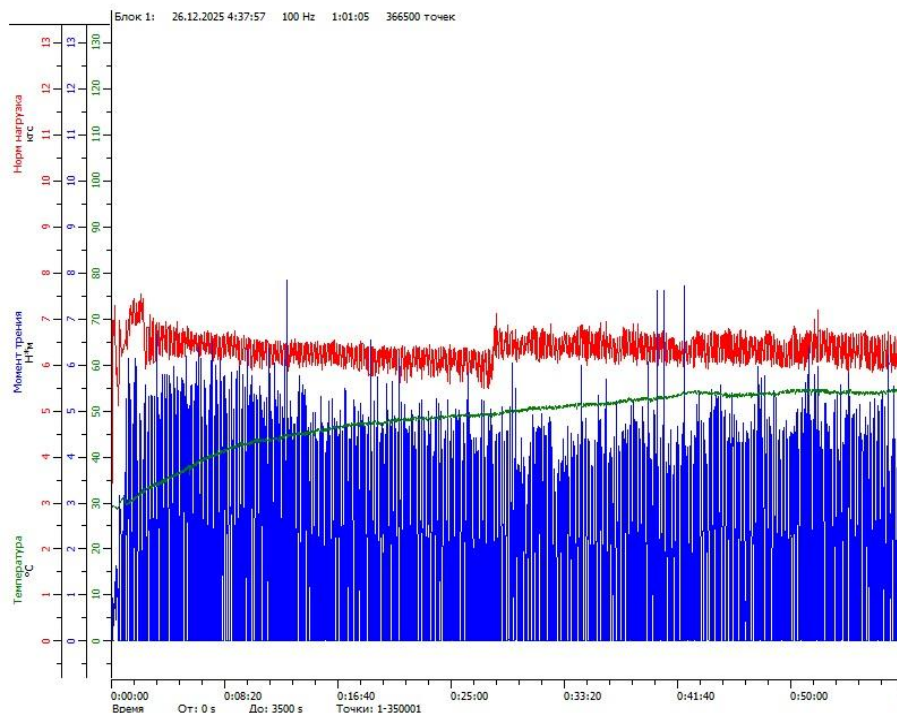


Рис. 6. Эпюры, полученные при изнашивании образца TiC (C2)-5 % Cu

Установлено, что в данных условиях катастрофические формы изнашивания уступают место усталостному изнашиванию, снижается скорость изнашивания материалов, происходит ощутимое снижение момента трения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-79-10187, <https://rscf.ru/project/24-79-10187>.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Получение длинномерного МАХ-кермета $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{-Al}$ методом СВС с самопроизвольной инфильтрацией расплавом алюминия / А.П. Амосов, Е.И. Латухин, Э.Р. Умеров, Д.М. Давыдов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2022. – № 3. – DOI: 10.17073/1997-308X-2022-3-24-36.
2. Формирование структуры и состава кермета TiC/Al при самопроизвольной инфильтрации расплава алюминия в пористый горячий каркас карбида титана, полученный методом СВС / Е.И. Латухин, Е.А. Амосов, Э.Р. Умеров, Д.М. Давыдов // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 4. – С. 3–12. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-4-3-12.
3. Каракич, Е.А. Конструирование оснастки для СВС-термитного синтеза / Е.А. Каракич, А.П. Амосов // Современные материалы, техника, технологии. – 2024. – № 1 (52). – С. 9–15.

СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

Карев В.Г., аспирант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: vldkarev@yandex.ru

Селективное лазерное плавление (SLM) в производстве штамповой оснастки – одно из ключевых направлений цифровизации современного машиностроения. Описаны основные этапы процесса, отмечены особенности технологии, преимущества метода, также приведен сравнительный анализ методов. Демонстрируется, что SLM является эффективным инструментом для создания высокотехнологичной оснастки и мощным дополнением к традиционным методам производства.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление (SLM), 3D-печать, аддитивные технологии; механическая обработка; сравнительный анализ методов обработки, производство

SELECTIVE LASER MELTING IN THE PRODUCTION OF STAMPING EQUIPMENT: TECHNOLOGICAL STAGES, ECONOMIC EFFICIENCY, AND PROSPECTS FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS

Karev V.G., PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: vldkarev@yandex.ru

Selective laser melting (SLM) in the production of stamping tools is one of the key areas of digitalization in modern mechanical engineering. The article describes the main stages of the process, highlights the features of the technology, advantages of the method, and provides a comparative analysis of the methods. The article demonstrates that SLM is an effective tool for creating high-tech tooling and a powerful addition to traditional manufacturing methods.

Keywords: selective laser melting (SLM), 3D printing, additive technologies; mechanical processing; comparative analysis of processing methods, production

Метод селективного лазерного плавления для создания штамповой оснастки состоит из последовательного нанесения тонких слоев металлического порошка, который точечно плавится мощным лазерным лучом согласно трехмерной CAD-модели [1]. Процесс протекает в камере, заполненной инертным газом для предотвращения окисления, и включает в себя опускание рабочей платформы для нанесения нового слоя и повторение цикла до полной готовности детали [2].

Этапы процесса:

- подготовка камеры: рабочая камера заполняется инертным газом (аргоном или азотом) для создания защитной атмосферы;
- нанесение порошка: тонкий слой металлического порошка (20–100 микрон) равномерно распределяется по рабочей платформе [3];
- лазерное плавление: мощный оптоволоконный лазер сканирует слой порошка, выборочно плавя и сплавляя частицы в соответствии с текущим сечением детали из CAD-модели;
- опускание платформы: после завершения плавления одного слоя рабочая платформа опускается на толщину слоя, и процесс нанесения порошка и его плавления повторяется;
- постобработка: после завершения печати деталь извлекается из камеры, очищается от избыточного порошка (который может быть повторно использован), удаляются поддерживающие элементы и проводится финишная обработка поверхности, включая шлифовку и механическую обработку.

SLM-принтеры могут быть более рентабельными при единичном производстве штамповой оснастки с уникальной геометрией, которую трудно или невозможно изготовить

на традиционных станках, несмотря на высокую начальную стоимость оборудования и материалов. Также данные принтеры позволяют создавать детали с высокой точностью и сложной геометрией, недоступной традиционным методам. Сравнительный анализ стоимости оборудования показывает, что промышленные 3D-принтеры, работающие по технологии SLM, имеют значительно более высокую первоначальную стоимость, чем традиционные токарные, фрезерные и сверлильные станки с ЧПУ (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ стоимости оборудования

Тип оборудования	Пример модели	Примерная стоимость (руб.)
Токарный станок с ЧПУ	MetalTec NEXT 36×750 Pro	1 417 000
Фрезерный станок с ЧПУ	TS 2030	866 686
Сверлильный станок с ЧПУ	ZK-40A	1 960 000
3D-принтер SLM	3DLAM Mini	6 000 000

При изготовлении штампов с помощью SLM необходима постобработка из-за достаточно низкой шероховатости поверхности и наличия внутренних пор (удаление поддержек, термообработка для снятия напряжений, финишная механическая обработка для достижения требуемой шероховатости поверхности).

Технология, о которой идет речь, является одной из лучших для производства тонкостенных деталей сложной геометрии, которые устойчивы к давлению и высоким температурам. Поэтому она нашла широкое применение в различных областях, таких как машиностроение, авиакосмическая и автомобильная промышленность, энергетика, медицина и другие [4]. Основные достоинства данной технологии: возможность печати очень сложных деталей, которые невозможно изготовить другими методами; быстрота изготовления по сравнению с другими технологиями – литьем, фрезерованием; возможность мелкосерийного и единичного производства – себестоимость печати единичного изделия практически неотличима от себестоимости при серийной печати. Сравнительный анализ данных методов представлен в табл. 2.

Механическая обработка на станках с ЧПУ выигрывает в производительности при массовом производстве стандартных деталей. SLM предпочтительнее для изготовления сложных, уникальных или мелкосерийных деталей, где важны гибкость проектирования и возможность создания сложных внутренних структур. Оптимальным решением будет комбинирование обоих методов: например, использование SLM для создания базовой формы с последующей доработкой на ЧПУ-станке.

Отечественные и зарубежные фирмы активно применяют создание гибридной оснастки: основа (например, из обычного конструкционного материала) изготавливается традиционными методами, а рабочая поверхность, требующая сложных каналов охлаждения или специального материала, «наращивается» с помощью SLM. Это помогает сбалансировать затраты и технологические преимущества и позволяет создавать сложные геометрические формы, включая каналы охлаждения, решетчатые структуры и другие элементы, которые трудно или невозможно получить традиционными методами.

С помощью SLM в производстве штамповой оснастки создают:

- пресс-формы и литейную оснастку из прочных сплавов, способных выдерживать высокие нагрузки и температуру. Это увеличивает срок их службы и позволяет оперативно вносить изменения в конструкцию [5];
- вставки для форм при литье под давлением со сложными каналами охлаждения или другими функциональными элементами;
- стержни и детали матриц термопластавтоматов из жаропрочных сплавов (например, Inconel 718), что продлевает срок их службы;
- штамповую оснастку с решетчатыми структурами, которая сочетает прочность и легкость;
- охлаждаемые пресс-формы с каналами конформного охлаждения, обеспечивающими равномерное распределение температуры и предотвращающими коробление, деформацию и другие дефекты.

Сравнение методов обработки

Критерий	Механическая обработка (ЧПУ)	Селективное лазерное плавление (SLM)
Скорость для стандартных деталей	Высокая, особенно при массовом производстве	Низкая (5–20 см ³ /ч)
Эффективность для сложных деталей	Требует дополнительных операций или нескольких установок	Позволяет создавать сложные геометрии за один цикл
Зависимость от геометрии детали	Увеличивается время обработки для сложных форм	Позволяет создавать сложные структуры без увеличения времени на перенастройку
Время непосредственной обработки	Зависит от сложности детали, материала и режимов резания. Для простых деталей может составлять несколько часов, для сложных – несколько дней	Зависит от объема детали, параметров лазера, толщины слоя. Например, деталь объемом 100 см ³ при скорости построения 10 см ³ /ч потребует около 10 часов построения
Вспомогательные операции	Включают время на смену инструмента, быстрые перемещения станка, настройку (закрепление заготовки, ввод программы ЧПУ)	Включают время на нанесение слоя порошка, очистку защитного стекла, продувку камеры инертным газом, подогрев и остывание камеры
Подготовка к производству	Требуется разработка управляющей программы, выбор инструмента и оснастки	Требуется оптимизации конструкции детали под особенности технологии (проработка припусков, проектирование поддерживающих структур), разработки управляющей программы
Постобработка	Может включать шлифовку, полировку и другие операции, но обычно требуется только для обеспечения определенных требований к поверхности	Часто необходима для удаления поддержек, зачистки мест их крепления, пескоструйной обработки, термообработки для снятия внутренних напряжений. В некоторых случаях требуется дополнительная механическая обработка для достижения точных размеров
Применение	Оптимально для массового производства однотипных деталей	Лучше подходит для прототипирования, мелкосерийного производства, уникальных изделий

Использование SLM для штамповой оснастки имеет следующие преимущества. Сложность геометрии. Возможность создавать детали с внутренними каналами, решетчатыми структурами и другими сложными элементами auroratech.ru +1. Сокращение времени производства. Исключение этапов подготовки оснастки и снижение количества технологических переходов ускоряют процесс изготовления. Экономия материалов. Минимизация отходов за счет послойного нанесения материала, особенно при работе с дорогими сплавами. Гибкость. Легкость внесения изменений в дизайн на этапе проектирования, что важно при мелкосерийном производстве или необходимости быстрой адаптации под новые требования. Высокая точность. Возможность достижения мелкой детализации (толщина слоя порошка от 15 до 100 микрон). SLM позволяет значительно повысить эффективность производства штамповой оснастки, особенно в случаях, когда имеет место высокая сложность конструкции, оперативность изготовления или работа с дорогими материалами.

Очевидно, что селективное лазерное плавление (SLM) – это передовая и многообещающая технология, которая формирует будущее производства. Благодаря своей способности эффективно работать с материалами, требующими специальных методов обработки, и создавать сложные детали с безупречной точностью и прочностью, SLM 3D-печать стала незаменимым инструментом в различных отраслях, включая автомобильную, аэрокосмическую области, научные исследования, медицину и многие другие. В целом зарубежный опыт показывает, что SLM – это не замена традиционным методам, а мощное дополнение к ним, позволяющее создавать оснастку с уникальными характеристиками и оптимизированной производительностью [6].

В Самаре есть предприятия и организации, которые занимаются аддитивным производством (3D-печатью металлом по технологии SLM) и могут быть потенциальными исполнителями для изготовления штамповой оснастки, к ним относятся крупные промышленные предприятия («РКЦ Прогресс», «ОДК-Кузнецов», ОАО «Электроштит» и др.) и вузы (Самарский государственный технический университет и Самарский университет им. С.П. Королева), которые активно исследуют и применяют аддитивные технологии, в том числе для изготовления штамповой и технологической оснастки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Современные численные модели и программные продукты в аддитивном производстве / М.Д. Кривилев, Г.А. Гордеев, В.Е. Анкудинов [и др.] // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы IV Международной конференции, Москва, 30 марта 2018 г. – Москва: ФГУП ВИАМ, 2018.
2. Способ получения заготовок деталей и сборочных единиц промышленных двигателей методом селективного лазерного сплавления металлического порошка / В.Г. Смелов, А.И. Хаймович, А.В. Агаповичев [и др.] // Описания изобретения к патенту. – Самара, 2022. – 7 с.
3. Хомутов, М. Структура и свойства сплава ЭП708, полученного в процессе послойного лазерного плавления / М. Хомутов, А. Травянов, П. Петровский // Цветные металлы. – 2018. – № 4. – С. 49–55.
4. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета, 2013. – 221 с.
5. Хмыров, Р.С. Разработка принципов технологической подготовки производства изделий, получаемых методом селективного лазерного плавления / Р.С. Хмыров, Т.В. Тарасова // Материалы и технологии XXI века. – 2013. – С. 101–107.
6. Агаповичев, А.В. Исследование влияния режимов селективного лазерного сплавления на качество заготовок: учебное издание / А.В. Агаповичев, А.В. Сотов, В.Г. Смелов. – Самара: Самарский государственный университет, 2017. – 30 с.

К ВОПРОСУ КЛАССИФИКАЦИИ ПОР, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА ЗАГОТОВОК

Киричек А.В., д.т.н., профессор, **Котлярова И.А.** [✉], доцент, к.т.н., доцент,
Макаренко К.В., д.т.н., профессор, **Зенцова Е.А.**, старший преподаватель,
Котляров М.М., магистрант

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация
E-mail: ikotlyarova@list.ru

Предложена классификация пор, выявленных в изделиях и заготовках, полученных методом электродугового аддитивного синтеза (WAAM), включая гибридную технологию с применением межслойного волнового деформационного упрочнения (ВДУ). В основу классификации положены четыре ключевых признака: механизм образования, размер, характер распределения и глубина залегания пор.

Ключевые слова: электродуговой аддитивный синтез, гибридная технология, пористость, классификация

ON THE CLASSIFICATION OF PORES ARISING IN THE PROCESS OF ELECTRO-ARC ADDITIVE SYNTHESIS OF PREFORMS

Kirichek A.V., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor,
Kotlyarova I.A. [✉], Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Makarenko K.V., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Zentsova E.A.**, senior lecturer,
Kotlyarov M.M., Master's Degree student

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation
E-mail: ikotlyarova@list.ru

The paper proposes a classification of pores identified in products and blanks obtained by the method of electric arc additive synthesis (WAAM), including hybrid technology using interlayer wave deformation hardening (IHD). The classification is based on four key features: the mechanism of formation, the size, the nature of the distribution and the depth of the pores.

Keywords: electro-arc additive synthesis, hybrid technology, porosity, classification

WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – интенсивно развивающаяся технология электродугового аддитивного синтеза изделий из проволоочных материалов, позволяющая получать заготовки из сплавов на основе титана, алюминия, никеля, а также различных марок сталей [1, 2]. Несмотря на очевидные преимущества аддитивных технологий (автоматизация процесса, снижение материалоемкости производства, уменьшение себестоимости выпуска единичной и мелкосерийной продукции), методу WAAM присущи и определенные недостатки, среди них – образование пор в структуре синтезированных заготовок [3, 4].

Поры относятся к трехмерным (объемным) дефектам кристаллического строения. Согласно ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012, применительно к сварным соединениям поры классифицируются как «полости» и разделяются по механизму образования на газовые полости, усадочные раковины и микроусадку. Внутри этих укрупненных групп поры систематизируют по характеру распределения (одиночные поры, скопления пор), морфологии (сферические поры, вытянутая полость), локализации на поверхности или в объеме материала (открытые и закрытые поры соответственно).

С учетом специфики аддитивных технологий (многократно повторяющиеся циклы нагрева, выраженная анизотропия структуры), особенно гибридных, сочетающих послойный

синтез с межслойным упрочнением материала (в частности, волновым деформационным упрочнением ВДУ), существующая классификация оказывается недостаточной для полной характеристики поровой структуры синтезированных заготовок. В связи с этим авторами была предпринята попытка классификации пор, характерных для аддитивной (WAAM) и гибридной (WAAM + ВДУ) технологий (рис. 1).

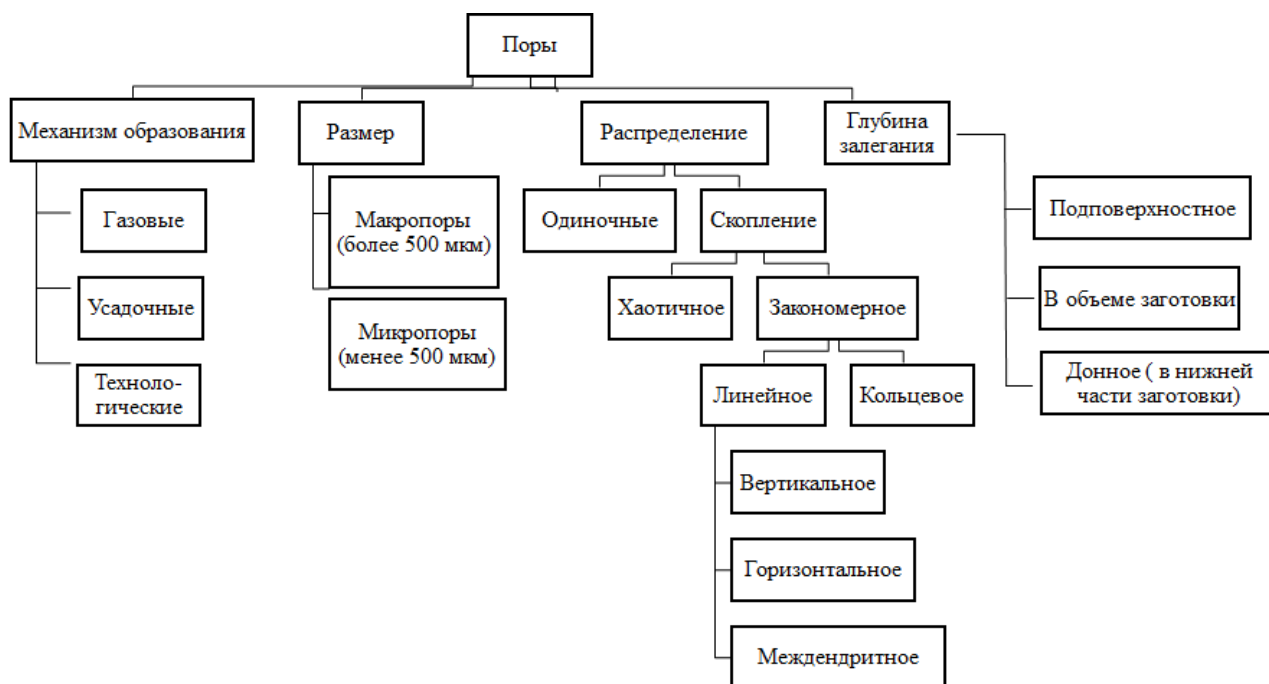


Рис. 1. Предлагаемая классификация пор
(пористость исследовалась металлографическим методом
(Leica DM IRM с программным обеспечением SIAMS 800, СЭМ KYKY-EM800)
на шлифах из заготовок, синтезированных из сплавов
08Г2С, 18ХГТ, 30ХГСВ, 12Х19Н10Т, 04Х19Н9, 09ХГНМТАА, АМгЗ)

В основу предложенной классификации положены четыре ключевых признака: механизм образования, размер, характер распределения (топология) и глубина залегания пор.

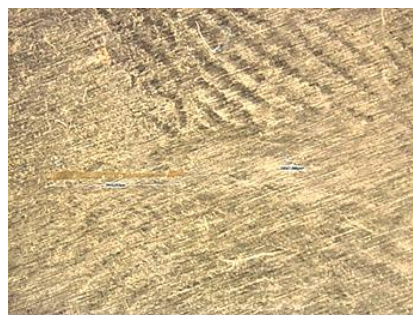
По механизму образования дефекты разделены на газовые, усадочные и технологические, образующиеся вследствие отклонения от заданных параметров синтеза.

Газовые и усадочные поры достаточно легко идентифицируются. Газовые полости характеризуются правильной сферической формой. Природа их образования обусловлена снижением растворимости газов при охлаждении кристаллизующегося расплава с последующей фиксацией газовых пузырьков в структуре синтезированного изделия при превышении скорости кристаллизации сплава скорости всплытия пузырьков на поверхность.

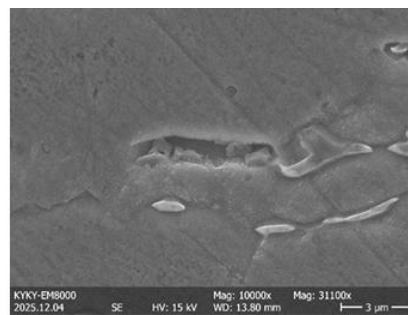
Усадочные поры, напротив, имеют неправильную, остроугольную форму. Их образование детерминировано особенностью фазового перехода «жидкий/твердый металл», а именно существенным увеличением плотности металла при затвердевании. Микроусадка, выявляемая только металлографическим методом (ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012), может локализоваться по границам зерен (междендритная усадка) или пересекать зерна металла (транскристаллическая микроусадка).

К технологическим порам относятся несплавления, локализуемые между синтезируемыми слоями или на границе «наплавленный слой/подложка», и «схлопнутые» поры, формирующиеся при неполной аннигиляции исходных пор под воздействием ВДУ (рис. 2).

Второй классификационный признак – размер пор. Согласно данной классификации, несплошности разделяются на макро- и микропоры с пороговым размером 500 мкм.



Технологическая макропора. Несплавление с подложкой. Сталь 08Г2С. Глубина залегания – донное. Поверхность образца шлифованная



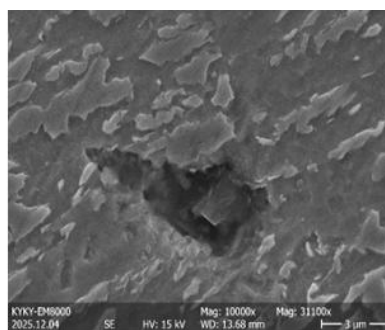
Технологическая, «схлопнутая», междендритная, усадочная микропора. Сталь 04Х19Н9. Обработка ВДУ. Подповерхностная

Рис. 2. Технологические поры

Макропоры (более 500 мкм) – несплошности, диагностируемые методами неразрушающего контроля, в частности ультразвуковой дефектоскопией и рентгенографией. Микропоры (менее 500 мкм) – несплошности, выявить которые можно исключительно методами разрушающего контроля (оптической или электронной металлографией) (рис. 3).



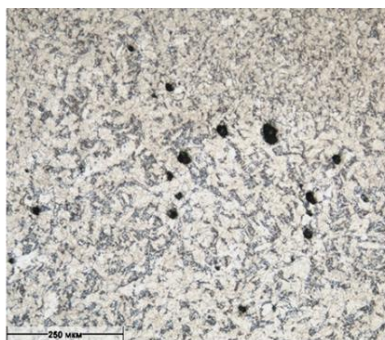
Газовая, одиночная, макропора. Сталь Св-30ХГСА. Без ВДУ, в объеме заготовки



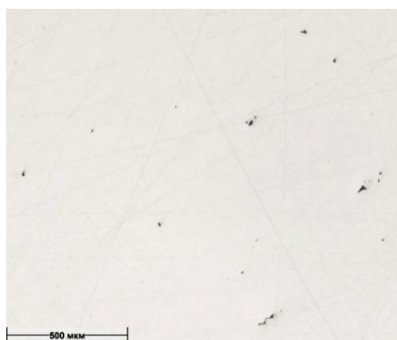
Одиночная, усадочная микропора. Сталь 09ХГНМТАА. Без ВДУ. Глубина залегания – в объеме заготовки

Рис. 3. Макро- и микропоры

Классификация пористости по топологическому признаку позволила выделить одиночные поры и скопления пор (кластеры) – хаотичные и закономерные. Закономерные поровые скопления локализуются линейно или концентрически в виде колец более или менее правильной формы. Линейные скопления в объеме синтезированной заготовки могут иметь вертикальную, горизонтальную ориентацию или располагаться в междендритных пространствах; это коррелирует с высокой анизотропией структуры аддитивно синтезированного материала (рис. 4).



Газовые скопление микропор закономерное (кольцевое). Сталь 08Г2С. Подповерхностные



Усадочные, хаотичные скопления, микропоры. Сталь 08Г2С. Обработка ВДУ УПЗ три слоя удар, в объеме заготовки

Рис. 4. Скопление пор и одиночные поры

Как правило, по высоте синтезированной заготовки поры располагаются неравномерно; наблюдаемая зональность обусловлена динамикой термических циклов и изменением градиента температур в процессе аддитивного синтеза. Из литературы известно, что технология регенерации сплошности синтезированного материала определяется локализацией пор, а именно открытые поверхностные поры устраняют механической обработкой или пропиткой различными составами. Поры, расположенные в слое материала, залечивают воздействием полей напряжений (технологий поверхностной пластической деформацией, в частности волновым деформационным упрочнением) [5, 6]. В связи с этим классификация пор по их пространственной локализации представляется крайне актуальной. По данному критерию предлагается дифференцировать поры на три категории – подповерхностные, «объемные» и донные, локализованные в нижних слоях синтезированного изделия.

Предложенная авторами классификация пор на данном этапе не является окончательной, работа по ее усовершенствованию продолжается. По мере накопления новых экспериментальных данных о порах, выявляемых в заготовках и изделиях при WAAM-синтезе, классификация будет уточняться и, вероятно, расширяться. В частности, уже сейчас отмечается системная закономерность в морфологии, генезисе и характере распределения пор в зависимости от химического состава сплава и выбранной схемы гибридной технологии (WAAM + ВДУ).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Должникова, А.О. WAAM-процесс как один из ведущих методов аддитивных технологий в машиностроении / А.О. Должникова, В.В. Неверов // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Сборник научных трудов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Тула, 13–15 ноября 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 78–82. – EDN OCROVM.
2. Гибридные технологии аддитивного WAAM-синтеза и деформационного упрочнения / А.В. Киричек, М.Н. Нагоркин, Л.Шенбо, Ч.Чжаобо // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2025. – Т. 21, № 8 (248). – С. 368–375. – DOI: 10.36652/1813-1336-2025-21-8-368-375. – EDN NGZIJR.
3. Кабалдин, Ю.Г. Структура и ее дефекты при аддитивном выращивании нержавеющей сталей методами лазерного спекания и электродуговой наплавки / Ю.Г. Кабалдин, М.А. Чернигин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2024. – Т. 67, № 1. – С. 65–72. – DOI: 10.17073/0368-0797-2024-1-65-72. – EDN AEJWRP.
4. Сравнительная оценка влияния технологий аддитивного синтеза на количество и размер пор в изделии / А.В. Киричек, О.Н. Федонин, С.О. Федонина, А.Г. Сергеев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 5 (131). – С. 20–26. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-5-20-26. – EDN QYDNFK.
5. Бетехтин, В.И. Закономерности залечивания пористости в некоторых кристаллических и аморфных материалах / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, О.В. Амосова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2003. – № 8. – С. 65–67. – EDN SBUJUL.
6. Влияние статического и динамического сжатия на залечивание пор в меди / А.И. Петров, М.В. Разуваева, А.Б. Синани, В.В. Никитин // Журнал технической физики. – 1998. – Т. 68, № 11. – С. 125–127. – EDN RYNZDR.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕРОДА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ СИНТЕЗЕ БОРИДА ВОЛЬФРАМА НА ЭЛЕКТРОДУГОВОМ РЕАКТОРЕ

Клятченко Е.В. [✉], студент, Курдюков А.В., студент, Пак А.Я., д.т.н., профессор

Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация
E-mail: evk103@tpu.ru

Исследовано влияние концентрации углерода (10–50 %) на энергетические параметры при синтезе боридов вольфрама в электродуговом реакторе. Установлено, что с ростом содержания углерода до 50 % потребляемая мощность и энергия составляют в среднем $\pm 2,17$ кВт и $\pm 133,30$ кДж соответственно, не демонстрируя значимой зависимости от содержания углерода.

Ключевые слова: безвакуумный электродуговой реактор, борид вольфрама

INFLUENCE OF CARBON CONCENTRATION ON ENERGY PARAMETERS IN THE SYNTHESIS OF TUNGSTEN BORIDE IN AN ELECTRIC ARC REACTOR

Klyatchenko E.V. [✉], student, Kurdyukov A.V., student,
Pak A.Ya., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
E-mail: evk103@tpu.ru

The effect of carbon concentration (10–50 %) on energy parameters during the synthesis of tungsten boride in an electric arc reactor has been studied. It was found that with an increase in the carbon content to 50 %, the power and energy consumption average ± 2.17 kW and ± 133.30 kJ, respectively, without demonstrating a significant dependence on the carbon content.

Keywords: vacuum-free electric arc reactor, tungsten boride

Бориды вольфрама относятся к классу тугоплавких соединений, обладающих уникальным комплексом свойств, таких как высокая твердость, износостойкость и термическая стабильность [1, 2], что делает их перспективными материалами для применения в качестве износостойких покрытий, режущего инструмента и компонентов высокотемпературных систем. Одним из эффективных методов синтеза тугоплавких соединений является безвакуумный электродуговой синтез, протекающий в атмосфере оксида углерода (II) СО и диоксида углерода СО₂. Электродуговой реактор позволяет проводить синтез, требующий высоких температур, превышающих 3000 °С, а также обеспечивать высокую скорость протекания процессов благодаря инициированию дугового разряда между графитовыми электродами [3]. Данный метод применим для синтеза широкого спектра соединений, в том числе и боридов вольфрама. Одним из преимуществ электродугового синтеза является отсутствие необходимости использования сложных вакуумных систем, благодаря чему можно значительно снизить затраты без снижения качества конечного продукта [4, 5]. Такой подход особенно важен для промышленности, где требуется не только получить подходящий материал, но и сделать это экономически выгодным.

Согласно обзору литературы, влияние состава исходной шихты, в частности содержания углерода, на энергопотребление и стабильность процесса электродугового синтеза боридных систем изучено недостаточно, что определяет актуальность данного исследования.

Роль углерода в составе шихты неоднозначна и может проявляться в нескольких аспектах. С одной стороны, он выступает в качестве компонента для создания газовой среды,

а также может вносить изменения в состав синтезируемого порошка, оставаясь примесью или образуя карбиды с компонентами шихты. С другой – углерод, являясь хорошим проводником, может влиять на электропроводность исходной смеси и, как следствие, на параметры процесса. Таким образом, для управления процессом необходимо установить, способен ли углерод оказывать влияние на энергетические характеристики синтеза. Несмотря на важность этого вопроса, данные о влиянии содержания углерода на энергетические параметры безвакуумного электродугового синтеза боридов вольфрама в литературе отсутствуют.

Целью данной работы являлось установление зависимости между концентрацией углерода в шихте на основе боридов вольфрама и энергетическими параметрами процесса электродугового синтеза.

Для достижения поставленной цели был проведен ряд экспериментов по исследованию влияния концентрации углерода (сажа) в шихте на энергетические параметры синтеза боридов вольфрама. Были подготовлены три состава шихты на основе пентаборида вольфрама WB_{5-x} с различным содержанием углерода: 10 %, 30 %, 50 %. Полученные составы были отправлены для гомогенизации в шаровую планетарную мельницу Retuch PM100 на помол длительностью 30 мин. Стакан и шары для помола выполнены из карбида вольфрама.

Синтез проводили в безвакуумном электродуговом реакторе [4–6]. Навеску шихты после перемешивания помещали в малый графитовый тигель, который накрывали крышкой и помещали в больший графитовый тигель. Для исключения попадания материала электродов в синтезируемый порошок поверхность контакта выстилали графитовой бумагой. К крышке малого тигля подводили графитовый стержень, выступавший в роли анода, в то же время система тиглей являлась катодом. Как было ранее сказано, электроды состоят из графита. Ключевым аспектом процесса является создание защитной атмосферы в ходе синтеза. При пропускании тока и возбуждении дуги происходит интенсивный нагрев графитовых элементов. В условиях высоких температур графит сублимирует и взаимодействует с кислородом воздуха. Это приводит к образованию защитной атмосферы, состоящей из оксида углерода (II) CO и диоксида углерода CO₂, которая предотвращает окисление синтезируемых соединений.

Возбуждение электрической дуги и проведение синтеза осуществляли путем пропускания постоянного тока силой 100 А в течение 60 с. Процесс проводили в атмосфере оксида углерода (II) CO и диоксида углерода CO₂. После завершения синтеза и остывания реактора продукт синтеза извлекали из тигля и подвергали измельчению в агатовой ступке, используя агатовый пестик.

В ходе синтеза ток и напряжение регистрировались осциллографом Rigol DS1052E. Полученные данные были использованы для расчета электрической мощности (1), где P – мощность (Вт), U – напряжение (В), I – сила тока (А), и электрической энергии по формуле (2), где W – энергия (кДж), P – мощность (кВт), t – время (с).

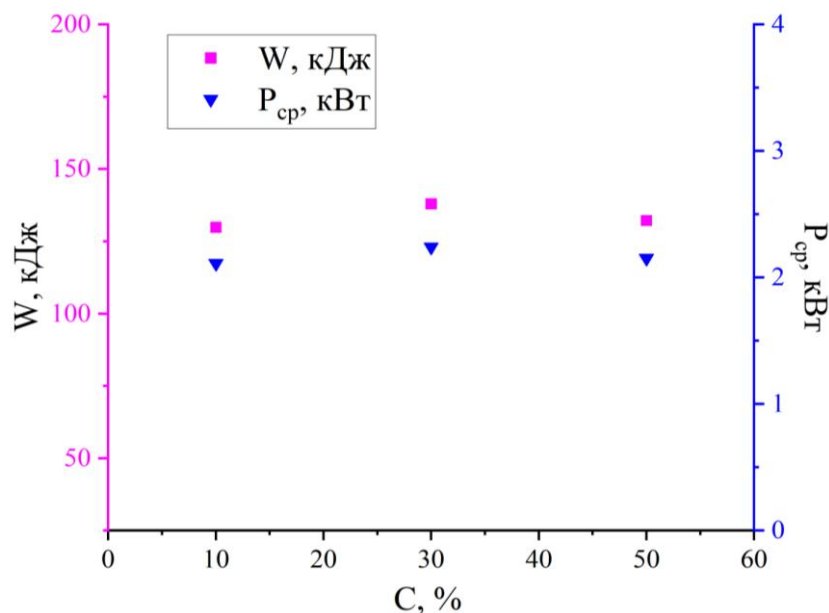
$$P = U \cdot I; \quad (1)$$

$$W = P \cdot t. \quad (2)$$

Анализ осциллограмм показал, что процесс протекал стабильно для всех трех составов шихты. Средние значения напряжения составляли 39–41 В, а силы тока 110–113 А.

На рисунке представлен график зависимости энергетических параметров от концентрации углерода. С повышением концентрации углерода с 10 до 50 % наблюдается незначительное изменение энергии – от 129 до 132 кДж, что указывает на отсутствие выраженной зависимости энергетических характеристик от концентрации углерода в этом диапазоне. Незначительный разброс значений мощности в диапазоне от 2,11 до 2,24 кВт, возможно, обусловлен погрешностью приборов и подтверждает стабильность процесса независимо от содержания углерода.

Полученные данные позволяют предположить, что наличие углерода, способного повлиять на интенсивность образования газовой среды во время синтеза, не оказывает значительного воздействия на энергетические характеристики.



Зависимость мощности и энергии электродугового синтеза от концентрации углерода в составе порошка

Таким образом, результаты экспериментов демонстрируют, что в исследованном диапазоне (10–50 %) концентрация углерода не оказывает значимого влияния на энергетические характеристики (мощность и энергию) электродугового синтеза борида вольфрама. Это указывает на возможность изменения состава шихты без риска нарушения режимных параметров и роста энергозатрат.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2026-0047).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Understanding the friction and wear behavior of tungsten boride coating at temperatures of 400–800 °C / Y. Liu, L. Xu, M. Shao [et al.] // *Wear*. – 2026. – Vol. 584–585. – Art. 206413.
2. Synthesis of titanium diboride by electric arc plasma in air / A.A. Svinukhova, A.Y. Pak, P.V. Povalyaev [et al.] // *Materials Chemistry and Physics*. – 2024. – Vol. 328. – Art. 129973.
3. Mechanical properties and thermal stability of tungsten boride films deposited by radio frequency magnetron sputtering / J. Chrzanowska-Gizynska, P. Denis, S. Wozniacka, L. Kurpaska // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44. – No. 16. – Pp. 19603–19611.
4. Vacuum-free electric arc method for synthesis of lanthanum hexaboride / A.A. Svinukhova, Yu.V. Li, A.Y. Pak [et al.] // *Ceramics International*. – 2025. – Vol. 51. – Pp. 48443–48448.
5. Синтез порошка карбида гафния в атмосферной дуговой плазме / Ю.З. Васильева, П.В. Поваляев, А.П. Корчагина [и др.] // *Журнал технической физики*. – 2023. – Т. 93. – Вып. 6. – С. 769–776.
6. Vacuum-free arc synthesis and characterization of crystalline molybdenum borides as instrumental material / Y. Vassilyeva, Y. Neklya, M. Lukanov [et al.] // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2025. – Vol. 67. – Art. 104134.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ДВУХСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ

Куликов В.Ю. , к.т.н., профессор, **Квон Св.С.**, к.т.н., профессор

НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова»,
г. Караганда, Республика Казахстан
E-mail: v.kulikov@ktu.edu.kz

Представлены результаты исследования механических свойств двухслойных покрытий. Определено, что предлагаемые составы напыляемых порошков позволяют остаточным напряжениям в покрытии перейти от малых растягивающих к большим сжимающим, что подтверждается проведенными исследованиями и свидетельствует о небольшой средней величине и равномерности по длине образцов. Это приводит к снижению общей величины механических напряжений и, как следствие, увеличению срока эксплуатации.

Ключевые слова: покрытие, порошок, газотермическая наплавка, структура

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TWO-LAYER COATINGS

Kulikov V.Yu. , PhD in Engineering Sciences, Professor,
Kvon Sv.S., PhD in Engineering Sciences, Professor

NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, Karaganda, Republic of Kazakhstan
E-mail: v.kulikov@ktu.edu.kz

The results of a study of the mechanical properties of two-layer coatings are presented. It is determined that the proposed compositions of sprayed powders allow residual stresses in the coating to move from small tensile to large compressive stresses, which is confirmed by the studies carried out and indicates a small average size and uniformity along the length of the samples. This leads to a decrease in the total amount of mechanical stresses and, as a result, an increase in service life.

Keywords: coating, powder, gas-thermal surfacing, structure

В настоящее время при эксплуатации различных деталей в производстве к ним предъявляются повышенные требования. В частности, это относится к деталям, работающим в условиях агрессивных сред – при высоких температурах, трении, в жидких средах. Очевидно, что при увеличении жаростойких, коррозионностойких и износостойких показателей свойств материалов деталей соответственно произойдет повышение срока их эксплуатации, что приведет к сокращению простоя оборудования и увеличению производительности. Следовательно, использование в узлах и агрегатах деталей с улучшенными свойствами является для производства актуальной задачей [1].

Для повышения срока службы деталей достаточно увеличить стойкость их поверхностного слоя, что удешевит себестоимость деталей.

В работах [2, 3] указано, что применение карбида титана как лигатуры способствует значительному изменению свойств материалов: увеличению твердости и износостойкости, гомогенизирует структуру и снижает анизотропию. В качестве подложки использовалась сталь 30ХГС, размер подложки 100 мм на 40 мм. Способ нанесения покрытия – газопламенное напыление.

Для напыления применялось оборудование Тена – ППМ (Белоруссия, г. Минск, ОДО «Тена»), режимы приведены в табл. 1.

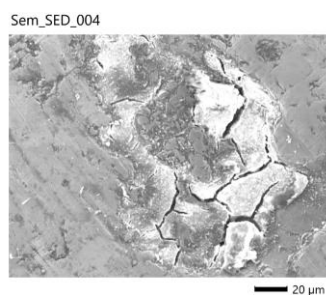
На первом этапе осуществлялось напыление демпфирующим сплавом, состоящим из порошков меди и алюминия в соотношении 4:1. На втором этапе – напыление порошком карбида титана (карбид титана TiC, 99,9 % 20 мкм, марка СВС).

Технологические параметры газодинамического напыления

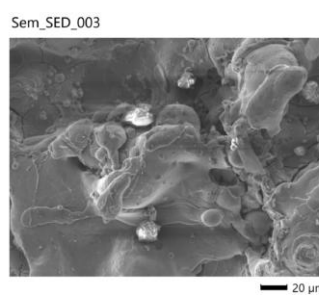
Параметр	Значение параметра
Скорость напыления, м/с	400
Угол напыления, °	30
Расстояние от сопла до образца, мм	50
Температура плавления, °C	1050

Исследование микроструктуры поверхности после напыления проводили после каждого этапа на электронном микроскопе Jeol JCM-7000, элементный состав изучался с помощью МРСА на энергодисперсионной приставке SDTM 30 с SI-детектором. Для определения износостойкости применяли прибор для определения износостойкости TABER ABRASER 352G. Для определения внутренних напряжений использовали измеритель концентрации напряжений ИКН-3.

На рис. 1 представлены микроструктуры образцов.



Образец 1



Образец 2

Рис. 1. Структура поверхности образцов после напыления

На образце 1 наблюдается выделение и растрескивание оксидной пленки. При этом поверхность образца 1 имеет гладкую форму, что свидетельствует о влиянии низкой шероховатости поверхности подложки. На шероховатость второго слоя оказывает влияние только поверхность слоя после первого напыления.

Измерителем концентрации напряжений ИКН-3М-12 оценивали механическую напряженность в образцах (рис. 2). Источниками напряжений в напыленном слое могут быть трещины, шлаковые включения, неметаллические включения и др. Измеритель дает возможность определять, регистрировать и обрабатывать напряженно-деформированное покрытие посредством метода магнитной памяти металла.

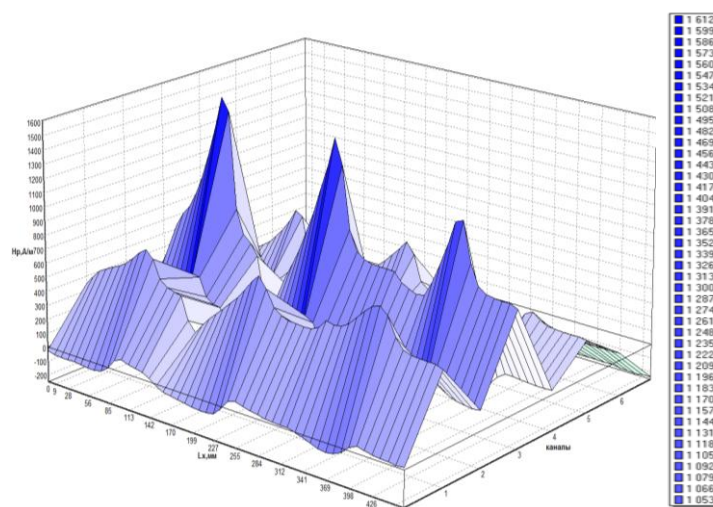


Рис. 2. Сравнительные трехмерные магнитограммы трех образцов

Исследовали образцы длиной 100 мм. На границе отрезанной части образца наблюдается всплеск напряжения, что говорит о деформации образца при отрезании при его подготовке. То есть источником всплеска напряжений является сама подложка, но не напыленный слой. Также можно отметить, что сами покрытия не имеют высоких напряжений (меньше 1000 А/м); это в целом свидетельствует о равномерности покрытия с точки зрения внутренних напряжений.

При этом в образце 2 напыленный слой имеет меньший уровень напряжений (до 400–450 А/м), тогда как в образце 1 в основном наблюдаются напряжения порядка 600 А/м. Для определения износостойкости использовали значение после 10 000, 20 000 и 30 000 вращений абразивного контртела по напыленному образцу (табл. 2).

Таблица 2

Результаты исследования износостойкости опытных образцов

Износостойкость, % (потеря веса)		
10000 вращений	20000 вращений	30000 вращений
96	92	89

Как видно из приведенных данных, исследуемые двухслойные покрытия имеют высокую износостойкость. При этом расхождение в степени износостойкости становится более очевидным с увеличением продолжительности периода работы в условиях износа. Следовательно, можно сделать вывод, что предлагаемый состав позволит обеспечить более длительную работу деталей.

Нанесение покрытий с использованием карбида титана и слоя сплава, обладающего демпфирующими свойствами (смесь порошков меди и алюминия), методом газотермического напыления обеспечивает твердость, почти аналогичную твердости покрытий, полученных с применением стандартного порошка, что связано с интенсивными обезуглероживающими процессами частиц мелкой фракции в результате большой удельной поверхности. При этом формируются прочные связи карбидных частиц, составляющих металлическую матрицу, что минимизирует вероятность их выпадения в процессе трения или при ударных нагрузках.

Данные исследования проведены в рамках реализации гранта Комитета науки МНВО РК АР 26199877 «Разработка технологии нанесения композиционных защитных покрытий на детали оборудования металлургической и машиностроительной отраслей».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зузов, В.Г. Анализ противоположной стойкости броневых сталей иностранного производства / В.Г. Зузов, Н. Шаш // Эл. журнал «Наука и образование. МГТУ им. Баумана». – 2017. – № 5. – С. 21–41.
2. Konca, E. A Comparison of the Ballistic Performances of Various Microstructures in MIL-A-12560 Armor Steel / E Konca // Metals. – 2020. – No. 10 (4). – Pp. 446.
3. Heating behaviour of plasma sprayed TiO_x/Cr₂O₃ coatings for injection moulding / K. Bobzin, W. Wietheger, M.A. Knoch, A. Schacht // Surface & Coatings Technology. – 2020. – Vol. 399. – Art. 126199.

СТРУКТУРНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВОГО АЛЮМИНИЯ С КАРБОНАТОМ КАЛЬЦИЯ КАК ПОРОФОРОМ

Лапин И.В. ✉, старший преподаватель, Захаров А.С., ассистент,
Гильмутдинов И.М., д.т.н., профессор

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Российская Федерация
E-mail: ilya.lapin.69@mail.ru

Рассмотрено влияние порообразователя CaCO_3 на формирование контактного каркаса и последующую пористую структуру алюминиевого композита. Для смеси Al (200–300 мкм) и CaCO_3 (53–71 мкм) в соотношении 85 % Al и 15 % CaCO_3 выполнено расчетное описание уплотнения по модели Хеккеля в Mathcad с получением зависимостей $D(P)$ и $\rho(P)$. Для перехода от средних зависимостей к структурной неоднородности проведено FEM-моделирование в ANSYS Mechanical с использованием плотностно-зависимой модели Drucker-PragerCap. Показано, что CaCO_3 , действуя как относительно жесткая дисперсная фаза в алюминиевой матрице, изменяет кинетику уплотнения и чувствительность к трению о стенки матрицы: при $\mu \approx 0,3$ наблюдается падение передаваемого давления и снижение плотности до ~10 % по высоте прессовки. Полученные выводы согласуются с результатами статьи авторов [1] и могут использоваться для управления однородностью пористости после разложения порофора при спекании.

Ключевые слова: пористая структура, порофор, карбонат кальция, компактизация, неоднородность плотности, Drucker-PragerCap

STRUCTURE-ORIENTED MODELING OF POWDERED ALUMINUM COMPACTION WITH CALCIUM CARBONATE AS A PORE FORMER

Lapin I.V. ✉, senior lecturer, Zakharov A.S., assistant,
Gilmutdinov I.M., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation
E-mail: ilya.lapin.69@mail.ru

The effect of CaCO_3 pore former on the contact skeleton evolution and the resulting porous architecture of an aluminum compact is analyzed. For a powder blend of Al (200–300 μm) and CaCO_3 (53–71 μm) at 85 % Al / 15 % CaCO_3 , the Heckel approach implemented in Mathcad is used to obtain $D(P)$ and $\rho(P)$. To capture structural heterogeneity, finite-element simulations in ANSYS Mechanical with a density-dependent Drucker-Prager Cap model are performed. CaCO_3 behaves as a relatively rigid dispersed phase within the aluminum matrix, affecting densification kinetics and friction sensitivity: for $\mu \approx 0.3$, a pressure transfer loss and density reduction up to ~ 10 % along the specimen height are observed. The conclusions are consistent with the authors' in-press paper [1] and support processing routes aimed at achieving a uniform porosity after CaCO_3 decomposition during sintering.

Keywords: porous structure, pore former, calcium carbonate, powder compaction, density gradients, Drucker-Prager Cap

При проектировании пористых металлических материалов ключевым параметром является не только средняя плотность заготовки после прессования, но и ее распределение по объему: именно оно задает будущую архитектуру пор после спекания и разложения порофора. В системе Al- CaCO_3 частицы порообразователя, отличаясь размером и жесткостью от алюминиевых частиц, меняют начальную упаковку, характер контактных мостиков

и условия передачи нагрузки внутри шихты. На ранних стадиях прессования происходит переукладка и заполнение межчастичных пустот алюминием вокруг включений CaCO_3 , а при росте давления возрастает вклад пластической деформации алюминия и контактного трения, что приводит к формированию градиентов плотности. Поэтому расчетное моделирование должно одновременно описывать усредненную кинетику уплотнения и пространственную неоднородность, обусловленную трением в пресс-форме и перераспределением напряжений в двухфазной порошковой системе [1, 2, 4].

Смесь составлена из алюминиевого порошка (200–300 мкм) и CaCO_3 (53–71 мкм) при массовом соотношении 85 % Al и 15 % CaCO_3 . Уплотнение оценивали в Mathcad по модели Хеккеля, связывающей относительную плотность D с давлением прессования P . Для оценки влияния контактов и трения на неоднородность уплотнения выполнено FEM-моделирование в ANSYS Mechanical: контакт со стенкой матрицы задан с коэффициентом трения $\mu = 0,3$, поведение порошковой среды аппроксимировано плотностно-зависимой моделью Drucker-Prager Cap [4].

$$D(P) = 1 - e^{kP-A}; \quad (1)$$

$$\ln \frac{1}{1-D} = kP + A; \quad (2)$$

$$\rho(P) = D \cdot \rho_{\text{теор.}}; \quad (3)$$

$$\rho(P) = \rho_0 + (\rho_{\text{max}} - \rho_0) \cdot (1 - e^{-kP}). \quad (4)$$

На рис. 1 приведен пример прогнозируемой зависимости плотности от давления по (4) при $k = 0,01$ и диапазоне плотности 500–900 кг/м³.

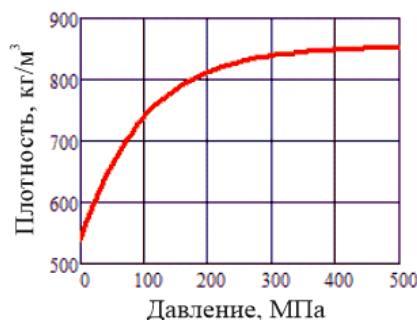


Рис. 1. Зависимость прогнозируемой (расчетной) плотности от давления прессования

В таблице приведены используемые граничные условия расчетной постановки.

Расстановка граничных условий

№	Тип условия	Значение	Примечание
1	Fixed	–	Низ матрицы закреплен, перемещения отсутствуют
2	Pressure	-500 МПа	Давление на верхней поверхности порошка через пуансон
3	Frictional Contact	$\mu = 0,3$	«Контакт порошок – матрица», моделирование трения о стенки

Аппроксимация по Хеккелю отражает переход от стадии переукладки частиц к стадии интенсивного уплотнения за счет пластической деформации алюминия: при низких давлениях резко снижается доля межчастичных пустот, далее рост плотности становится более плавным и приближается к предельному значению [1, 2]. С точки зрения структуры, присутствие CaCO_3 создает в объеме прессовки сеть жестких включений, вокруг которых формируются локальные зоны повышенных контактных напряжений; это усиливает чувствительность компакта к потерям давления на трение.

Расчеты и результаты FEM-моделирования представлены на рис. 2, 3, 4.

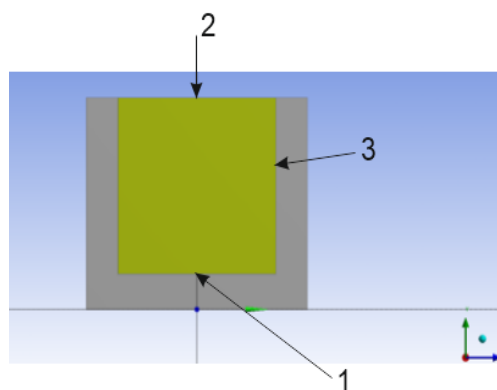


Рис. 2. Геометрия моделирования и расстановка граничных условий

FEM-результаты показывают характерную картину: вблизи пуансона достигается максимальная плотность, тогда как у противоположного торца и в приповерхностной зоне у стенки матрицы сохраняется повышенная пористость. При $\mu \approx 0,3$ перепад плотности по высоте составляет порядка 10 %. Для материалов с заданной пористостью это означает, что без учета трения и неоднородности уже на стадии прессования закладывается неравномерность будущего распределения пор после разложения CaCO_3 при спекании, что может проявляться в градиенте механических свойств и проницаемости. Практически это требует применения смазок, двустороннего прессования или оптимизации геометрии матрицы для выравнивания поля давления [4].

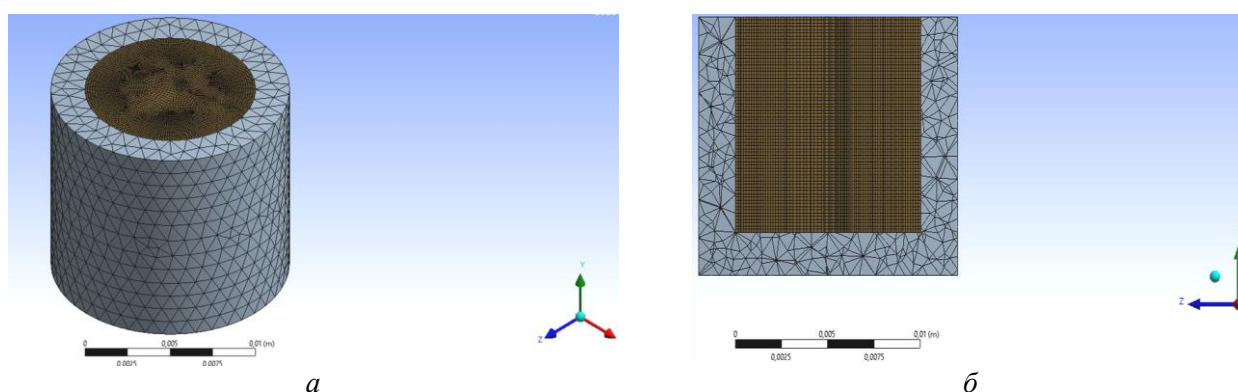


Рис. 3. Расчетная сетка модели
а – изометрия, б – в разрезе

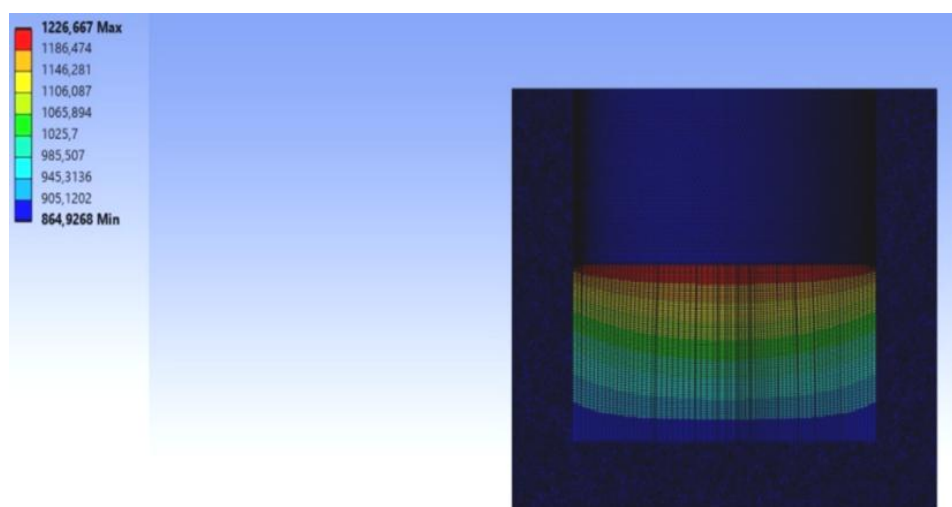


Рис. 4. Результат моделирования прессования в программе ANSYS

Выводы

1. Для смеси Al-CaCO₃ (85/15) модель Хеккеля в Mathcad обеспечивает описание кинетики уплотнения и прогноз $D(P)$, $\rho(P)$ при заданных параметрах (в т. ч. $k = 0,01$).
2. CaCO₃ как порофор выступает структурообразующей жесткой фазой, влияющей на контактный каркас и чувствительность прессовки к трению; поэтому контроль однородности плотности критичен для последующей архитектуры пор [5].
3. FEM-моделирование с моделью Drucker-PragerCap показывает градиенты плотности по высоте и радиусу; при $\mu \approx 0,3$ снижение плотности по высоте может достигать ~10 %.
4. Для получения более равномерной пористости после спекания целесообразно снижать трение (смазка, обработка поверхности), рассматривать двустороннее прессование и подбирать давление с учетом допуска на неоднородность [1, 4].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лапин, И.В. Моделирование процесса прессования порошкового алюминия с карбонатом кальция / И.В. Лапин, А.С. Захаров, И.М. Гильмутдинов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2026. – № 1. – С. 300–309.
2. Михеева, А.С. Применение математической модели Хеккеля для подбора оптимального диапазона давления прессования / А.С. Михеева, К.В. Алексеев, Е.В. Блынская // Фармация. – 2015. – № 8. – 18 с.
3. Demirbag, N. Microstructure and mechanical behavior of CaCO₃-doped Al-Al₂O₃ composite foams produced by powder metallurgy / N. Demirbag, S. Abali // Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences. – 2025. – Vol. 11. – No. 1. – Pp. 63–71.
4. Фук, Д.В. Исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета ABAQUS / Д.В. Фук, С.В. Ганин, В.Н. Цеменко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2016. – № 1 (238). – С. 100–110.
5. Лапин, И.В. Получение пеноалюминия с применением альтернативного порофора / И.В. Лапин, И.М. Гильмутдинов // Вестник Югорского государственного университета. – 2024. – Т. 20, № 1. – С. 46–50.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВНУТРЕННИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Максимук А.В.^{1,2}, управляющий, аспирант, **Берков Д.В.**^{1✉}, ведущий инженер, к.т.н.,
Майдан Д.А.², к.т.н., доцент, **Пуларгин Д.А.**², студент

¹ ООО «Научно-производственный центр «Самара», г. Самара, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: berkov@npcsamara.ru

Электрохимические методы в настоящее время рассматриваются как один из наиболее информативных и чувствительных инструментов для оценки состояния и качества внутренних антикоррозионных покрытий насосно-компрессорных труб. Их применение позволяет не только фиксировать изменения барьерных свойств защитного слоя, но и выявлять начальные стадии деградации покрытия, включая развитие подповерхностной коррозии металла, которая зачастую не обнаруживается традиционными методами контроля. Существенным преимуществом электрохимических подходов является возможность проведения исследований без разрушения покрытия, что особенно важно при анализе эксплуатационных образцов и проведении ресурсных испытаний. Однако их применение эффективно лишь тогда, когда через покрытие действительно происходит проникновение электролита и растворенных в нем газов. Такое проникновение реализуется только при воздействии высоких температур и давления, характерных для условий эксплуатации и автоклавных испытаний. При атмосферном давлении и комнатной температуре покрытие частично восстанавливает непроницаемость, и электрохимические сигналы не отражают реальной деградации покрытия, произошедшего в ходе автоклавного испытания. Поэтому возникает необходимость разработки метода, объединяющего в себе электрохимические измерения и автоклавный метод в единой системе.

Ключевые слова: внутренние защитные покрытия, насосно-компрессорная труба, коррозия, автоклавные испытания, электрохимические методы, импедансная спектроскопия, поляризационные кривые Тафеля, in situ, высокая температура, высокое давление, электрохимическая ячейка высокого давления

QUALITY ASSESSMENT OF INTERNAL PROTECTIVE COATINGS OF TUBING PIPES USING A HIGH-PRESSURE ELECTROCHEMICAL CELL

Maksimuk A.V.^{1,2}, Managing Director, PhD student,
Berkov D.V.^{1✉}, leading engineer, PhD in Engineering Sciences,
Maydan D.A.², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Pulargin D.A.², student

¹ LLC "Research and Production Center "Samara", Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: berkov@npcsamara.ru

Electrochemical methods are among the most promising tools for evaluating the quality of internal anticorrosion coatings of tubing, as they allow monitoring changes in barrier properties without damaging the coating. However, their effectiveness is ensured only when the electrolyte and gas phase can actually penetrate through the coating. Such penetration occurs only under high temperatures and pressures characteristic of operating conditions and autoclave testing. At atmospheric pressure and room temperature, the coating partially restores its impermeability, and electrochemical signals do not reflect the actual degradation that occurred during autoclave exposure. Therefore, it is necessary to develop a method that combines autoclave testing and electrochemical measurements within a single system.

Keywords: internal protective coatings, tubing, corrosion, autoclave testing, electrochemical methods, impedance spectroscopy, Tafel polarization curves, in situ, high temperature, high pressure, high-pressure electrochemical cell

Внутренние полимерные покрытия – один из наиболее распространенных методов защиты от коррозии металлических материалов, таких как насосно-компрессорные трубы, используемые на месторождениях с высоким содержанием коррозионно-активных веществ. Однако такие покрытия часто выходят из строя из-за агрессивной и сложной среды. Поэтому изучение возможности применения полимерных покрытий в условиях эксплуатации (высокое давление, высокая температура, наличие коррозионно-активных газов) имеет большое значение.

В настоящее время в РФ для оценки возможности эксплуатации внутренних антикоррозионных покрытий НКТ (в том числе в средах с содержанием H_2S) применяется отраслевой стандарт ГОСТ Р 58346-2019 «Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические требования» [1], в который включен автоклавный метод испытания покрытий, разработанный при участии коллектива ООО «НПЦ «Самара» [2–4]. Качество покрытия после автоклавного теста оценивается с помощью измерения адгезии покрытия к металлу. Несмотря на то, что метод оценки покрытия с помощью измерения адгезии включен в национальный стандарт ГОСТ Р 58346-2019 в качестве критерия качества покрытия, он обладает рядом существенных ограничений. Во-первых, это разрушающий метод контроля. Во-вторых, для построения прогностических моделей на его основе требуется проведение масштабных автоклавных испытаний с множеством образцов и различной продолжительностью выдержки, что делает процесс крайне трудоемким и ресурсозатратным. Поэтому была поставлена задача изучить возможность применения импедансной спектроскопии (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) в качестве дополнительного инструмента анализа. Метод электрохимической импедансной спектроскопии в комбинации с методом построения поляризационных кривых широко применяется за рубежом [5, 6] для оценки барьерных свойств защитных антикоррозионных покрытий.

В настоящей работе рассматривается цикл статей, в которых изложен опыт применения электрохимических методов для оценки состояния внутренних антикоррозионных покрытий НКТ и показано, как этот опыт привел к разработке «Электрохимической ячейки высокого давления для испытаний антикоррозионных защитных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность труб». Также в статье будут рассмотрены практические результаты экспериментов, полученные при помощи «Электрохимической ячейки высокого давления для испытаний антикоррозионных защитных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность труб» (ЭЯВД).

Классические электрохимические методы контроля защитных покрытий, такие как спектроскопия электрохимического импеданса и построение поляризационных кривых, традиционно используются для оценки барьерных свойств полимерных материалов. Однако при исследовании внутренних покрытий насосно-компрессорных труб, предназначенных для эксплуатации в условиях высокого давления, повышенной температуры и присутствия коррозионно-активных газов, выяснилось, что эти методы оказываются практически непригодными для достоверной диагностики состояния покрытия, в случае если электрохимические исследования покрытия осуществляются при комнатной температуре и атмосферном давлении.

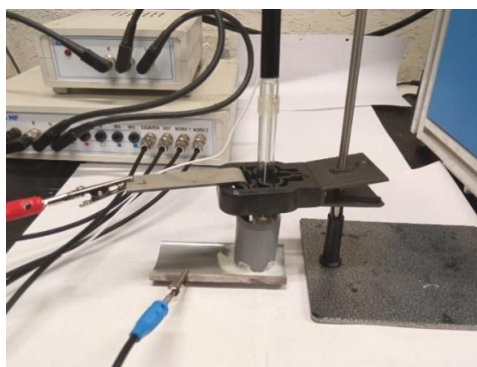


Рис. 1. Трехэлектродная ячейка для исследования фрагмента НКТ73 с защитным покрытием

После проведения испытаний в автоклаве при повышенных давлениях (порядка 80 атм) и температуре около 90 °С под защитным покрытием формируются коррозионные продукты, а также возникают дефекты в виде пор и микронарушений структуры. Тем не менее при электрохимических измерениях, выполняемых уже после извлечения образцов НКТ с покрытием из автоклава, в атмосферных условиях, регистрируются токи, находящиеся на уровне шумов, а годографы импеданса представляют собой почти вертикальные линии, характерные для идеального диэлектрика. Это связано с тем, что эластичная полимерная матрица после снятия давления и температуры восстанавливает свои барьерные свойства, препятствуя проникновению электролита к металлу и фактически блокируя проявление любых электрохимических процессов.

Следовательно, корректная электрохимическая оценка состояния покрытия не может проводиться после завершения испытаний, выполненных при повышенных давлениях, температурах и в присутствии агрессивных газовых компонентов. Получение достоверных результатов возможно лишь при регистрации параметров непосредственно в процессе воздействия указанных факторов, т. е. «*in situ*». С этой целью была создана специализированная единица оборудования – электрохимическая ячейка высокого давления, предназначенная для исследования антикоррозионных покрытий внутренней поверхности труб. Данная система конструктивно совмещает функции автоклава и электрохимической измерительной ячейки, что обеспечивает возможность одновременного проведения испытаний и контроля. В рамках данного подхода реализована концепция ЭЯВД, позволяющая объединить автоклавное воздействие и электрохимическую диагностику в едином экспериментальном процессе [7, 8], которая является одновременно и электрохимической ячейкой, и автоклавом.



Рис. 2. ЭЯВД при проведении испытаний

Практическое применение ЭЯВД позволило получить данные, которые невозможно зарегистрировать классическими методами. В частности, измерения, выполненные *in situ*, показали, что уже через несколько суток воздействия давления и температуры годографы импеданса начинают отклоняться от чисто емкостного поведения: формируется дуга, свидетельствующая о появлении токопроводящих путей через дефекты покрытия. Эти изменения (полученные с помощью ЭЯВД) полностью отсутствуют при исследованиях покрытия в обычной трехэлектродной ячейке после автоклава.

Таким образом, в серии работ [7–9] был разработан подход, основанный на применении электрохимической ячейки высокого давления для исследования антикоррозионных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность труб. Данный метод обеспечивает возможность контроля состояния защитного слоя НКТ непосредственно в ходе автоклавных испытаний, что позволяет получать более достоверную информацию о процессах его деградации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 58346-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические требования. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 23 с.
2. Пат. на полезную модель № 130878 U1 Российская Федерация, МПК B01J 3/04, B01L 1/02. Лабораторный автоклав: № 2013107637/05; заявл. 20.02.2013; опубл. 10.08.2013 / Юдин П.Е., Желдак М.В., Петров С.С., Александров Е.В., Манахов А.М.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр «Самара».
3. Александров, Е.В. Новая методика автоклавного теста для экспресс-анализа антикоррозионных покрытий / Е.В. Александров, П.Е. Юдин, Ж.В. Князева // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2015. – № 3 (49). – С. 3–11.
4. Юдин, П.Е. Оценка барьерных свойств внутренних антикоррозионных покрытий нефтепроводных и насосно-компрессорных труб с помощью автоклавного теста / П.Е. Юдин, Ж.В. Князева // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2016. – № 1 (53). – С. 3–8.
5. Preparation and anticorrosive performance of waterborne epoxy resin composite coating with amino-modified graphene oxide / D. Nan, X. Li, D. Li [et al.] // Polymers. – 2022. – Vol. 15. – No. 1. – P. 27.
6. Ding, C. A waterborne epoxy composite coating with smart corrosion resistance based on 2-phenylbenzimidazole-5-sulfonic acid/layered double hydroxide composite / C. Ding, J. Wu, Y. Liu [et al.] // Molecules. – 2023. – Vol. 28. – No. 13. – P. 5199.
7. Разработка электрохимической ячейки высокого давления для испытаний внутренних антикоррозионных покрытий НКТ / А.В. Максимук, Д.В. Берков, А.Г. Вережкин, М.В. Богатов // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т. 23, № 5. – С. 141–153. – URL: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2025-5-141-153>
8. Максимук, А.В. Электрохимическая ячейка высокого давления для изучения состояния внутренних защитных покрытий НКТ при воздействии высоких температуры и давления в присутствии сероводорода / А.В. Максимук, Д.В. Берков // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 3-й Международной научно-технической конференции, Воронеж, 09 октября 2025 года. – Воронеж: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 267–274.
9. Максимук, А.В. Применение электрохимической ячейки высокого давления в комплексе с методом поляризационных кривых Тафеля для оценки антикоррозионных свойств внутренних покрытий насосно-компрессорных труб / А.В. Максимук, Д.В. Берков, А.П. Амосов // Современные инновации в технике и технологиях: сборник научных статей Международной научно-технической конференции, Воронеж, 18 ноября 2025 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 186–196.

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 12Х17Г9АН4 ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Муратов В.С.¹, д.т.н., профессор, **Морозова Е.А.**², к.т.н., доцент,
Якимов Н.С.^{3✉}, к.т.н., главный металлург

^{1,2} Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

³ ОАО «ЕПК Самара», г. Самара, Российская Федерация

E-mail: andrej.bakin2013@yandex.ru

Исследовано влияние температурных режимов закалки на микроструктуру и механические свойства хромомарганцевоникелевой с азотом стали марки 12Х17Г9АН4. Предложен режим термической обработки, позволяющий достигать требуемого для деталей авиационной техники комплекса механических свойств: предел прочности, относительное удлинение и относительное сужение не менее 700 МПа, 45,0 % и 55,0 % соответственно. Параметры режима: температура закалки 1000 °С, время выдержки 20 минут, охлаждение в воде, температура отпуска 200 °С, время выдержки 2 часа, охлаждение на воздухе.

Ключевые слова: хромомарганцевоникелевая с азотом сталь, термическая обработка, свойства, структура, авиационная техника

FEATURES OF HEAT TREATMENT OF 12H17G9AN4 STEEL FOR AIRCRAFT PARTS

Muratov V.S.¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor,
Morozova E.A.², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Yakimov N.S.^{3✉}, PhD in Engineering Sciences, Chief metallurgist

^{1,2} Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

³ JSC "EPK SAMARA", Samara, Russian Federation

E-mail: andrej.bakin2013@yandex.ru

The effect of quenching temperatures on the microstructure and mechanical properties of 12H17G9AN4 chromium-manganese-nitrogen steel was studied. A heat treatment regime is proposed that achieves the required set of mechanical properties for aircraft components: tensile strength, relative elongation, and relative contraction of at least 700 MPa, 45.0 %, and 55.0 %, respectively. The regime parameters were: quenching temperature of 1000 °C, holding time of 20 minutes, water cooling, tempering temperature of 200 °C, holding time of 2 hours, and air cooling.

Keywords: chromium-manganese-nitrogen steel, heat treatment, properties, structure, aircraft

Для деталей авиационной техники перспективно применение хромомарганцевоникелевых с азотом сталей (в частности, марка 12Х17Г9АН4), которые относятся к коррозионно-стойким сталям аустенитного класса. Присутствие аустенитообразующих марганца и азота позволяет использовать пониженное содержание никеля и применять такие стали, как заменители коррозионностойких сталей типа 12Х18Н9Т. В ряде работ имеются сведения о режимах термической [1] и деформационной [2] обработки, особенностях структуры и свойств [3] данных сталей. Вместе с тем для конкретных деталей авиационной техники требуется разработка и производственная апробация режимов термической обработки, позволяющих обеспечивать достижение требуемого уровня механических свойств.

Целью настоящей работы является разработка режимов термической обработки стали 12Х17Г9АН4 для обеспечения требуемого уровня механических свойств деталей авиационной техники.

Исследования выполнены на горячекатаных прутках стали 12Х17Г9АН4 диаметром 120 мм. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали 12Х17Г9АН4 (вес. %)

Элемент	C	SI	MN	NI	CR	N	S	P
Содержание	0,10	0,39	8,26	4,14	16,63	0,19	0,020	0,020

Термическая обработка вырезанных из прутка продольных образцов проводилась в электрических камерных печах ПК-71, ПК-21. При этом температура закалки варьировалась в интервале 1000–1100 °С, время выдержки составляло 20 минут, охлаждение проводилось в воде, температура отпуска составляла 200 °С, время выдержки 2 часа, охлаждение на воздухе. Испытания на растяжение выполнялись на установке ГУРМ-20, а микроструктурные исследования – на световом микроскопе Olympus GX71. Химический состав стали оценивался на оптико-эмиссионных установках Q8 MAGELLAN и S5 Solaris CCD Plus согласно ГОСТ Р 54153-2010.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследуемая марка стали используется для изготовления деталей (клапаны, втулки, гайки) стойки передней опоры шасси вертолетов с рулежным агрегатом и рулевым приводом. Нормативная документация требует для данных деталей достижения уровня механических свойств не ниже: предел прочности 700 МПа, относительное удлинение 45,0 %, относительное сужение 55,0 %.

В табл. 2 приведены значения механических свойств после различных вариантов термической обработки. Как видно из приведенных данных, требуемый уровень свойств стали достигается при температуре закалки 1000 °С.

Таблица 2

Механические свойства стали 12Х17Г9АН4

Температура закалки, °С	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
1000	730	61,5	83,0
1050	690	63,0	83,0
1100	670	63,0	81,0

Микроструктура стали после режимов термической обработки с разными температурами закалки приведена на рис. 1 и 2. Сталь имеет аустенитную структуру с проявляющимися признаками преимущественной ориентированности зерен. С увеличением температуры закалки наблюдается укрупнение аустенитного зерна, что обуславливает снижение предела прочности стали.

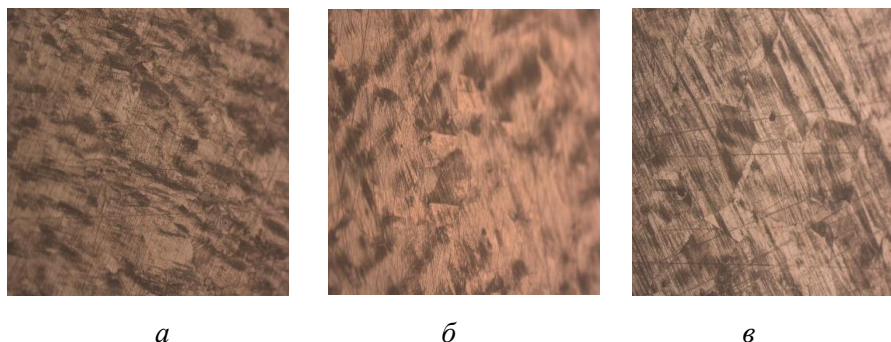


Рис. 1. Микроструктура стали 12Х17Г9АН4:
а – $T_3 = 1000$ °С; б – $T_3 = 1050$ °С; в – $T_3 = 1100$ °С $\times 200$

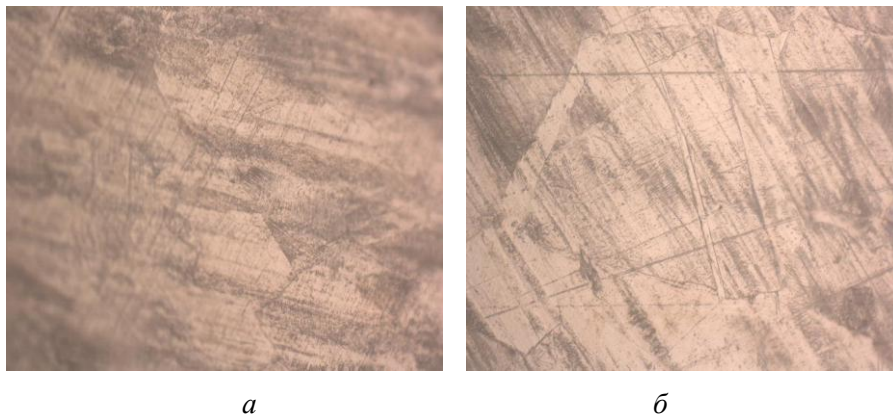


*Рис. 2. Микроструктура стали 12Х17Г9АН4:
а – $T_3 = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $T_3 = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\times 500$*

Таким образом, разработан режим упрочняющей термической обработки перспективной хромомарганцевоникелевой с азотом стали марки 12Х17Г9АН4 для деталей стойки передней опоры шасси вертолетов. Режим предполагает проведение заковки в воде с температурой $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отпуска при температуре $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ длительностью 2 часа и обеспечивает предел прочности стали 730 МПа, относительное удлинение 61,5 % и относительное сужение 83,0 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петров, В.Ф. Исследование влияния закалочного охлаждения на микроструктуру стали 12Х17Г9АН4-Ш / В.Ф. Петров, А.С. Максимова, Е.А. Пожилова // Черные металлы. – 2022. – № 1. – С. 78–81.
2. Структура и деформационные свойства аустенитной нержавеющей стали / Н.С. Сурикова, И.В. Власова, Н.А. Наркевич [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121, № 3. – С. 314–321.
3. Grain boundary strengthening in high Mn austenitic steels / J.-H. Kang, S. Duan, S.-J. Kim, W. Bleck // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 2016. – Vol. 5. – Iss. 47. – Pp. 1918–1921.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХРОМСОДЕРЖАЩЕЙ ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ

Нгуен Ш.Х.¹, аспирант, Иванов С.Г.^{1,2,3}, д.т.н., в.н.с.

¹ Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул, Российская Федерация

² Инновационный центр современных текстильных технологий (Лаборатория Цзяньху), Шаосин, Китай

³ Ключевая государственная лаборатория цифрового текстильного оборудования провинции Хубэй, Ухань, Китай

E-mail: syhaimta@gmail.com

Термоциклическая обработка (ТЦО) является эффективным способом улучшения механических и эксплуатационных свойств изделий из черных и цветных металлов. В настоящем исследовании представлены результаты применения нового режима термоциклической обработки хромсодержащей аустенитной высокомарганцевистой стали. Сущность нового режима заключается в выдержке при 550 °С при нагреве в первом цикле, что приводит к формированию перлитной структуры, которая при последующем нагреве до температуры аустенитизации позволяет измельчить зерно за счет реализации механизма гетерогенного зарождения новой фазы. При этом выделения хромсодержащих карбидов, имеющих средний размер 4,2 мкм, выступают в качестве закрепляющих частиц, предотвращая рост и слияние образующихся из перлита зерен аустенита. Результаты определения ударной вязкости и металлографического анализа микроструктуры показали, что режим с промежуточной выдержкой при 550 °С приводит к измельчению размера зерна (средняя площадь зерна составила 3,2 мм² при режиме ТЦО с промежуточной выдержкой при 550 °С в первом цикле нагрева против 4,2 мм² – при ТЦО без промежуточной выдержки) и повышению ударной вязкости на 37 %.

Ключевые слова: термоциклическая обработка, аустенитная высокомарганцевистая сталь, промежуточный нагрев, микроструктура, механические свойства

EFFECT OF CYCLIC HEAT TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CHROMIUM-CONTAINING AUSTENITIC HIGH-MANGANESE STEEL

Nguyen S.H.¹, PhD student, Ivanov S.G.^{1,2,3}, Grand PhD in Engineering Sciences, lead researcher

¹ Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

² Innovative Center for Advanced Textile Technologies (Jianhu Laboratory), Shaoxing, China

³ Key State Laboratory of Digital Textile Equipment of Hubei Province, Wuhan, China

E-mail: syhaimta@gmail.com

Cyclic heat treatment (CHT) is an effective method for improving the mechanical and service properties of components made of ferrous and non-ferrous metals. In the present study, the results of applying a new cyclic heat-treatment regime to a chromium-containing austenitic high-manganese steel are presented. The essence of the new regime lies in a holding stage at 550°C during heating in the first cycle, which leads to the formation of a pearlitic structure. Upon subsequent heating to the austenitizing temperature, this structure enables grain refinement through the mechanism of heterogeneous nucleation of the new phase. At the same time, precipitates of chromium-containing carbides with an average size of 3.268 μm act as pinning particles, preventing the growth and coalescence of austenite grains formed from pearlite. Based on impact toughness measurements and metallographic analysis of the microstructure, it is shown that the regime with intermediate holding at 550 °C leads to grain refinement (the average grain area was 3.2 mm² for the CHT regime with intermediate holding at 550 °C in the first heating cycle, compared to 4.2 mm² for CHT without intermediate holding) and to a 37 % increase in impact toughness.

Keywords: cyclic heat treatment, austenitic high-manganese steel, intermediate heating, microstructure, mechanical properties

Аустенитная высокомарганцовистая сталь разработана Робертом Гадфильдом в 1882 году и, как правило, содержит 12–13 % Mn и 1,0–1,3 % C (соотношение Mn:C $\approx$ 10:1). Она обладает выдающимися свойствами: высокой прочностью, ударной вязкостью и превосходной износостойкостью при ударно-абразивном нагружении, для нее характерна интенсивная и равномерная деформационная упрочняемость при эксплуатации. Поэтому ее широко применяют для изготовления дробильных элементов, ковшей экскаваторов, железнодорожных рельсов и др. [1]. В последние годы сталь Гадфильда и ее разновидности рассматриваются как перспективные материалы для автомобилестроения благодаря их равномерному наклепу и высокой способности к поглощению энергии [2].

Измельчение зерна – один из ключевых подходов к созданию материалов нового поколения с повышенными показателями характеристик, поскольку при этом одновременно повышаются показатели прочности и вязкости. Для формирования более мелкозернистой микроструктуры разработан ряд методов, включающих интенсивную пластическую деформацию [3, 4] и термическую обработку [5, 6]. Кроме того, при легировании сильными карбидообразующими элементами (Cr, V, Ti, ...) формирование в аустенитной матрице сфероидных, мелкодисперсных карбидных частиц способствует росту твердости, способности к деформационному упрочнению под действием внешней нагрузки и износостойкости в условиях абразивного износа [7–9].

Целью настоящей работы являлась разработка нового режима термоциклической обработки и исследование ее влияния на микроструктуру и механические свойства хромосодержащей аустенитной высокомарганцовистой стали.

Подготовлены образцы высокомарганцовистой аустенитной стали с размерами $10 \times 10 \times 55$ мм³. Химический состав образцов проанализирован методом оптической эмиссионной спектроскопии (OES), результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав

Элемент	Mn	C	Cr	P	S	Fe
Содержание, масс. %	12,7 $\pm$ 0,08	1,15 $\pm$ 0,01	1,9 $\pm$ 0,09	0,035 $\pm$ 0,003	0,027 $\pm$ 0,002	ост.

Процесс термической обработки выполнялся в камерных печах типа СНОЛ, оснащенных ПИД-контроллерами.

Режимы термоциклической обработки выбирали по рекомендациям работ [10]. Режим 1 (образец 1, традиционная термоциклическая обработка): 4 цикла «нагрев – охлаждение»; в каждом цикле – выдержка 10 мин при 950 °C с последующим охлаждением на воздухе до 450 °C (без изотермической выдержки при 450 °C). Режим 2 – образец 2 (предлагаемый режим, рис. 1): предварительный нагрев с выдержкой 30 мин при 550 °C, далее 4 цикла «нагрев – охлаждение» в диапазоне 950 $\leftrightarrow$ 450 °C; выдержка при 950 °C – 20 мин, затем охлаждение на воздухе до 450 °C (без выдержки при 450 °C). В заключительном цикле оба образца закаливали до комнатной температуры в солевом растворе 20 % NaCl.

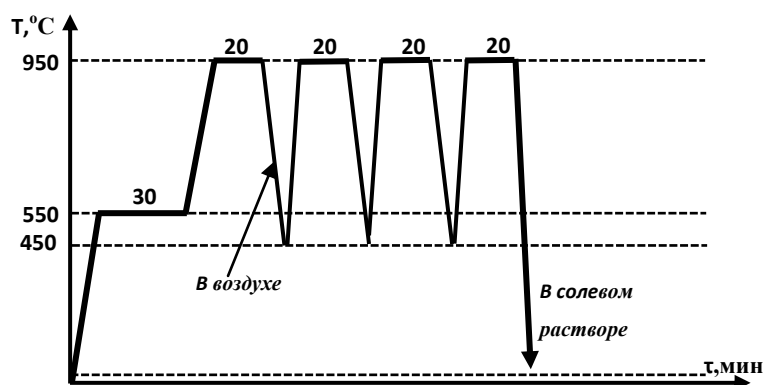


Рис. 1. Новый режим термоциклической обработки

Определение ударной вязкости производили на образцах с U-образным надрезом (KCU) на маятниковом копре Метротест КМ-300. Микротвердость определяли на микротвердомере МН-6 при нагрузке 100 г на поперечных шлифах в сердцевине и в приповерхностной зоне образцов.

Вырезка и запрессовка в бакелитовый компаунд металлографических темплет осуществлялись с помощью прецизионного отрезного металлографического станка MICRACUT-201 и металлографического прессы METAPRESS-P. Шлифовка и полировка проводились на автоматическом шлифовально-полировальном станке DIGIPREP.

Травление выполнялось 2 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Анализ микроструктуры, размера аустенитных зерен и выделившихся фаз осуществлялся при помощи программного комплекса ThixometPro с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer Z1m.

Результаты определения микротвердости и ударной вязкости показаны на рис. 2.

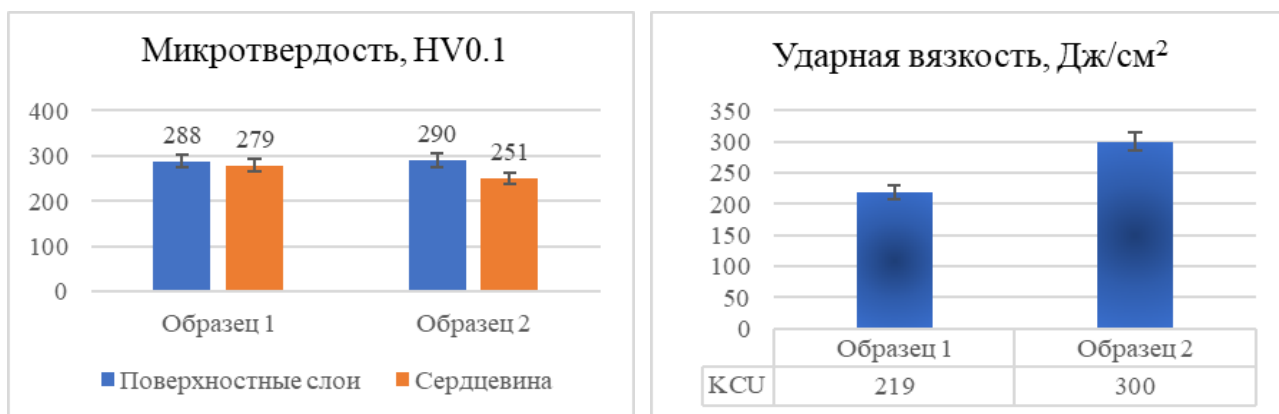


Рис. 2. Микротвердость и ударная вязкость

Рис. 3, а и в показывают отсутствие мартенсита и обезуглероживания в обоих образцах; после ударных испытаний в поверхностных областях фиксируются только двойники. В приповерхностных слоях плотность двойников выше, чем в центральных областях, что свидетельствует о состоянии наклепа и обуславливает повышенную твердость поверхности по сравнению с сердцевиной. Рис. 3, б и г также демонстрируют, что после двух различных режимов термоциклической обработки структура обоих образцов представляет собой однородный аустенит; выделившиеся карбиды преимущественно сфероидизированы, мелкодисперсны и равномерно распределены в матрице (табл. 2). Такое распределение способствует повышению прочности (за счет снижения склонности к накоплению внутренних напряжений при ударном нагружении) и росту износостойкости стали.

Образец, термообработанный по режиму 2, имеет меньшую среднюю площадь аустенитных зерен и размер выделившихся фаз, чем по режиму 1 (см. табл. 2). В соответствии с законом Холла – Петча [11] уменьшение размера зерна пропорционально повышает прочность стали. Поэтому ударная вязкость образца 2 выше по сравнению с образцом 1 примерно на 37 %. При меньшем размере аустенитного зерна в микроструктуре присутствует большее число зерен с различной кристаллографической ориентацией. При зарождении трещины ее распространение ограничивается первой встреченной границей зерна, далее трещина либо повторно зарождается в соседнем зерне, либо распространяется вдоль границы зерна (последний случай – более вероятный). Увеличение числа мелких зерен удлиняет суммарный путь развития трещины, вынуждая ее огибать и пересекать многочисленные границы зерен, и, как следствие, понадобится большая работа разрушения и лучшая сопротивляемость хрупкому разрушению.

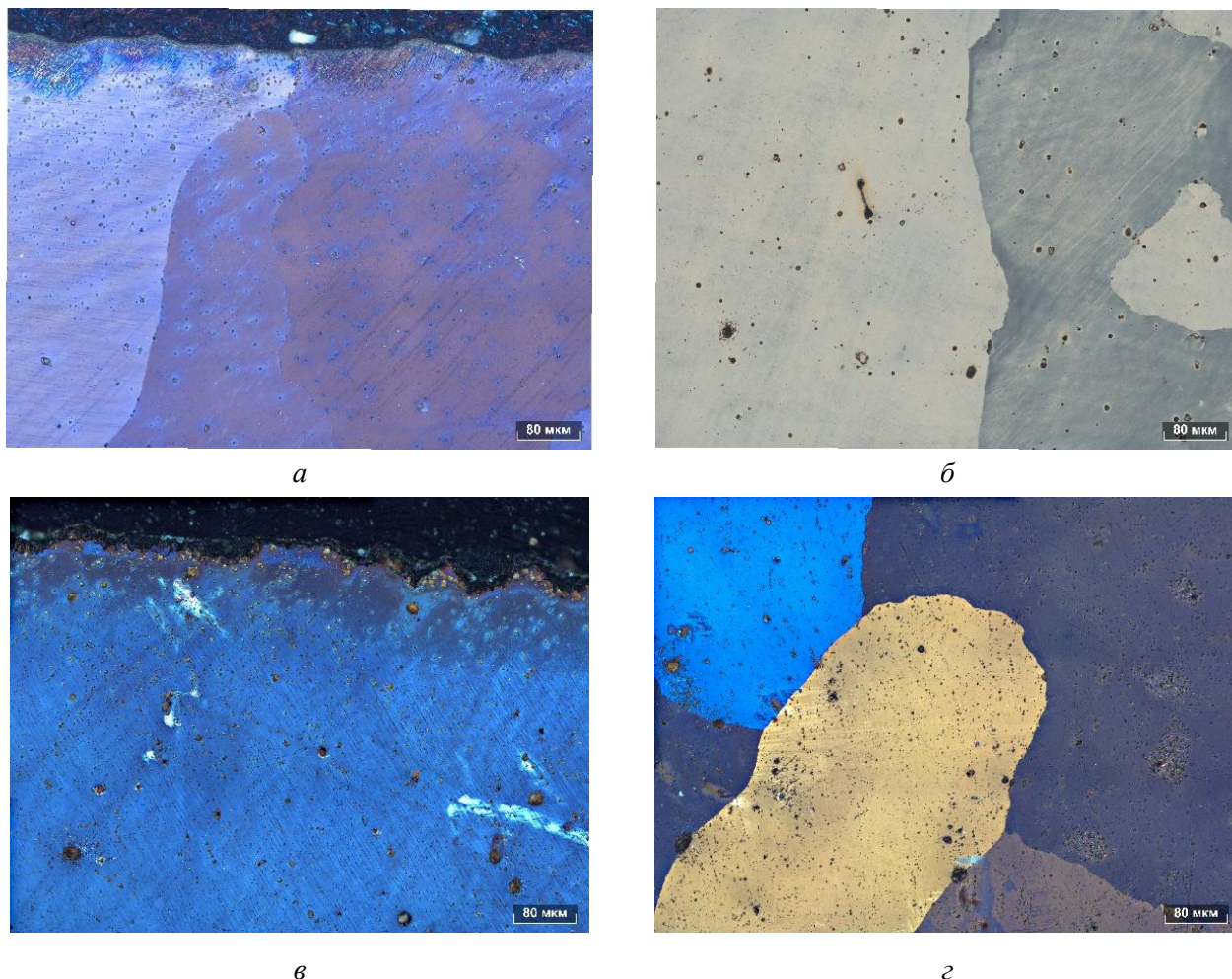


Рис. 3. Микроструктура поверхностной области (а, в) и сердцевины (б, г):
а, б – образец 1; в, г – образец 2

Таблица 2

Средний размер зерен

Образец	Средний размер выделившихся фаз, мкм	Средняя площадь аустенитных зерен, мм ²
1	4,184	4,2
2	3,268	3,2

Более выраженный эффект измельчения зерна при режиме 2 по сравнению с режимом 1 обусловлен тем, что помимо положительного влияния самих циклов «нагрев – охлаждение» дополнительный вклад вносит промежуточный нагрев при 550 °С. Нагрев и выдержка при 550 °С способствуют формированию перлита и хромсодержащих карбидов. При последующем повышении температуры вплоть до аустенизации перлит также претерпевает аллотропное превращение и, соответственно, порождает новые аустенитные зерна меньшего размера [5] за счет реализации механизма гетерогенного зарождения новой фазы. Одновременно хромистые карбиды играют роль фиксаторов границ новых зерен, препятствуя их росту и слиянию во время выдержки при 950 °С.

На основании полученных результатов показано, что предлагаемый режим термоциклической термообработки с промежуточной выдержкой при 550 °С в первом цикле нагрева обеспечивает лучшие показатели ударной вязкости, чем традиционный режим термоциклической обработки без выдержки при 550 °С в первом цикле нагрева. Средняя площадь зерна уменьшается на 24 % – с 4,2 мм² до 3,2 мм², ударная вязкость образцов, термообработанных по предложенному режиму ТЦО с промежуточной выдержкой в первом цикле нагрева

при 550 °С, составила 295 ± 5 Дж/см², что на 37 % больше по сравнению с ударной вязкостью образцов, термообработанных по режиму № 1 (без промежуточной выдержки при 550 °С в первом цикле нагрева). По результатам испытаний на трехточечный ударный изгиб основной механизм упрочнения хромосодержащей высокомарганцевистой стали – деформационное двойникование исходя из того, что мартенсит не обнаружен.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ASM metal handbook volume 01. Properties and Selection ferrous Alloys and Special-Purpose materials. – 1991.
2. Grajcar, A. Corrosion resistance of High-Mn austenitic steels / A. Grajcar, S. Kolodziej, W. Krukiewicz // Archives of Materials Science and Engineering. 2010. – Vol. 42. – Iss. 2. – Pp. 77–84.
3. Effect of surface nanocrystallization on abrasive wear properties in Hadfield steel / W. Yan, L. Fang, Z. Zheng [et al.] // Tribology International. – 2009. – Vol. 42. – Iss. 5. – Pp. 634–641. – DOI: 10.1016/j.triboint.2008.08.012.
4. Strain hardening and nanocrystallization behaviors in Hadfield steel subjected to surface severe plastic deformation / C. Chen, B. Lv, X. Feng [et al.] // Materials Science & Engineering A. – 2018. – Vol. 729. – Pp. 178–184. – DOI: 10.1016/j.msea.2018.05.059.
5. Bandanadjaja, B. The effect of two-step solution heat treatment on the impact properties of Hadfield austenitic manganese steel / B. Bandanadjaja, E. Hidayat // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1450. – DOI: 10.1088/1742-6596/1450/1/012125.
6. The influence of heat rate and austenitization temperature on microstructure and hardness of Hadfield steel / H. Wahyudi, S.E. Pratiwi, A.A. Supriyanto [et al.] // SINERGI. – 2023. – Vol. 27. – No. 2. – Pp. 241–248. – DOI: 10.22441/sinergi.2023.2.012.
7. Moghaddama, E.G. On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel / E.G. Moghaddama, N. Varahrama, P. Davamia // Materials Science and Engineering A. – 2012. – Vol. 532. – Pp. 260–266. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.089.
8. Tecza, G. Microstructure of Cast High-Manganese Steel Containing Titanium / G. Tecza, A. Garbacz-Klempka // Archives of Foundry engineering. – 2016. – Vol. 16. – Iss. 4. – Pp. 163–168. – DOI: 10.1515/afe-2016-0103.
9. The Deformation, Strain Hardening, and Wear Behavior of Chromium-Alloyed Hadfield Steel in Abrasive and Impact Conditions / M. Lindroos, M. Apostol, V. Heino [et al.] // Tribol Lett. – 2015. – Vol. 57. – Iss. 24. – DOI: 10.1007/s11249-015-0477-6.
10. Нгуен, Ш.Х. Влияние различных режимов термической обработки на изменение микроструктурных характеристик и механических свойств стали Гадфильда / Ш.Х. Нгуен // Проблемы механики современных машин: сборник статей IX Международной конференции. – 2025. – С. 188–194. – DOI: 10.53980/9785907942622_188. – EDN XTRWGX.
11. Petch, N.J. The Cleavage Strength of Polycrystals / N.J. Petch // Journal of the Iron and Steel Institute. – 1953. – Vol. 174. – Pp. 25–28.

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ИЗОТЕРМИЧЕСКИ ЗАКАЛЕННОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

Панов А.Г.¹, д.т.н., профессор, **Гуртовой Д.А.**², к.т.н., консультант первого заместителя генерального директора – исполнительного директора ПАО «КАМАЗ»,
Балдин С.В.³, аспирант

¹ Ярославский государственный технический университет,

г. Ярославль, Российская Федерация

E-mail: panov.ag@mail.ru

² ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Российская Федерация

E-mail: gurtovoyda@mail.ru

³ Ярославский государственный технический университет,

г. Ярославль, Российская Федерация

E-mail: sergeybaldin@mail.ru

Работа посвящена проблеме увеличения ресурса службы деталей турбомашин и поршневых двигателей, изготавливаемых из высокопрочных чугунов и упрочненных изотермической закалкой. Показано, что известные данные по сопротивлению усталости таких чугунов трудно поддаются анализу, поскольку представлены преимущественно только в виде данных по пределам выносливости, определенных по разным методикам и в разных условиях испытаний. Представлены результаты испытаний 41 образца и определены тенденции влияния времени изотермической выдержки на циклическую долговечность при растяжении-сжатии легированного чугуна с шаровидным графитом, закаленного при 350 °C с различным временем выдержки.

Ключевые слова: изотермически закаленный высокопрочный чугун, циклическая долговечность, предел выносливости, твердость, детали двигателей

THE EFFECT OF ISOTHERMAL HOLDING TIME ON THE CYCLIC DURABILITY OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON

Panov A.G.¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor,
Gurtovoy D.A.², PhD in Engineering Sciences, Consultant to the First Deputy General Director – Executive Director of KAMAZ PJSC, **Baldin S.V.**³, PhD student

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

E-mail: panov.ag@mail.ru

² “KAMAZ” PJSC, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

E-mail: gurtovoyda@mail.ru

³ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

E-mail: sergeybaldin@mail.ru

The work is devoted to the problem of increasing the service life of parts of turbomachines and piston engines made of ductile iron and hardened by austempering. It is shown that the known data on the fatigue resistance of such cast irons are difficult to analyze, since they are mainly presented only in the form of data on endurance parameters determined using different methods and under different test conditions. The test results of 41 samples are presented and the trends in the influence of isothermal holding time on the cyclic durability under tension and compression of alloy ductile iron, austempered at 350 °C with different holding time, are determined.

Keywords: austempered ductile iron, cyclic durability, endurance limit, hardness, engine parts

Детали, изготавливаемые из разных видов чугуна, используются во многих отраслях промышленности [1]. В частности, многие детали двигателей внутреннего сгорания, изготавливаемые из разных видов чугуна, эксплуатируются в сложных условиях высоких цикличе-

ских механических и температурных нагрузок, которые требуют от них высокой прочности и сопротивления усталости [2]. Одним из перспективных способов увеличения прочности высокопрочного чугуна является изотермическая закалка, направленная на получение бейнитной структуры их матрицы [1]. Режим изотермической закалки состоит из следующих двух операций: первая – аустенитизация, проводится при температуре 850–920 °С, или до порядка 950 °С, с выдержкой для насыщения аустенита углеродом; вторая – переохлаждение аустенита до температуры ниже его распада на феррито-цементитную смесь с последующим его превращением в изотермических условиях при температуре 280–550 °С.

Из анализа публикаций по изотермической закалке [3–5], следует, что, варьируя температурно-временные режимы на каждой из указанных стадий, можно эффективно управлять конечной структурой металлической матрицы изотермически закаленного высокопрочного чугуна (ИЗВЧ) и тем самым получать требуемый уровень свойств в изделиях. Вместе с тем, несмотря на большое количество публикаций по изотермически закаленным чугунам, в отечественной литературе не удается найти детальные данные о циклической долговечности, в справочных изданиях приводятся лишь общие сведения по пределу выносливости, преимущественно заимствованные из зарубежных источников [1].

В зарубежных источниках встречается более подробная информация по сопротивлению изотермически закаленных высокопрочных чугунов циклическим нагрузкам (сопротивлению усталости), например, [6–9]. Однако она также ограничена и трудно поддается анализу, поскольку содержит преимущественно обобщенные данные в виде пределов выносливости, определенных по разным методикам и в разных условиях испытаний. В частности, ряд данных представлен в табл. 1, из которой следует, что в разных источниках содержатся противоречивые данные как по маркам, так и по уровню свойств.

Таблица 1

Известные данные о механических свойствах ИЗВЧ

Марка ИЗВЧ	σ_B , МПа, $\geq$	Предел выносливости σ_{-1} (τ_{-1})		НВ	Источник
		МПа	метод		
ADI 800	800	410	при вращении / плоском изгибе	250–310	[8]
ADI 900	900	420		280–340	
ADI 1050	1050	440		320–380	
ADI 1200	1200	385		340–420	
800-10	800	272 / 312 / (240)	при растяжении, сжатии / при вращении / плоском изгибе	250–310	СТБ ISO 17804/JS
900-8	900	288 / 333 / (252)		280–340	
1050-6	1050	304 / 357 / (262)		320–380	
1200-3	1200	312 / 372 / (264)		340–420	
1400-1/ HBW400	1400	308 / 378 / (252)		380–480	
HBW450	1600	304 / 377 / (246)		≥ 450	

Поэтому представляет интерес продолжение набора данных по циклической долговечности изотермически закаленного высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, полученного при различных режимах изотермической закалки, особенно в области максимальных пределов выносливости, оцениваемой по известным опубликованным данным.

Для исследований использовались литые заготовки легированного высокопрочного чугуна с химическим составом, механическими свойствами и микроструктурой в литом состоянии, представленными в табл. 2.

Химический состав экспериментальных образцов

Химический состав, масс. %										Механические свойства			
C	S	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mg	Mo	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	HB
3,60	0,009	2,08	0,35	0,067	1,32	0,75	0,036	0,055	0,11	790	530	5,6	269
Микроструктура: ШГф4,5; ШГр1,2; ШГд25,45; ШГ10; П85													

Изотермическую закалку образцов осуществляли по следующим режимам. Разогрев и выдержку при температуре 900 ± 20 °С проводили в печах сопротивления с закрытыми нагревателями СНОЛ-1100 в специально изготовленных ящиках из нержавеющей стали. Для защиты образцов от окисления использовали древесный березовый уголь. Время аустенитизации всех образцов после их прогрева на всю глубину составляло 60 минут. Время на нагрев T_n рассчитывали по формуле

$$T_n = 1 \times H, \quad (1)$$

где H – характеристическая толщина образца в мм.

Закалку и изотермическую выдержку проводили в расплаве солей 50 % NaNO_3 + 50 % KNO_3 в специально изготовленных ваннах из нержавеющей стали, помещенных в печи сопротивления СНОЛ-900.

Температуру закалки и изотермической выдержки в 350 °С выбрали исходя из желания выйти на уровень свойств марок СТБ ISO 17804/JS/1050-6...1200-3 на основе анализа литературных данных. Время изотермической выдержки варьировали от 1 до 6 ч с шагом 3 часа.

Для оценки корректности выполнения изотермической закалки до испытания образцов на каждом режиме определяли их твердость методом Бринелля при нагрузке 1000 кг шариком диаметром 5 мм.

Для реализации испытаний были приняты образцы тип I ГОСТ25.502-79 с одним отличием, а именно шероховатостью рабочих поверхностей не выше $Ra_{6,3}$, превышающей требования стандарта ($Ra_{1,6}$), но соответствующей требованиям к шероховатости поверхности промышленных деталей типа валов зубчатых передач трансмиссии автомобилей.

Испытания циклической долговечности проводили на резонансной частоте в районе 100 Гц на испытательной машине Vibrophore 250 начиная от максимальной амплитуды нагружения 400 МПа и двигаясь вниз с шагом 10–20 МПа в зависимости от получаемых результатов.

Всего циклическую долговечность испытывали с привлечением 46 образцов.

Исследовали твердость образцов после изотермической закалки. Результаты измерений сведены в табл. 3. Исследование показало, что при температуре ИЗ 350 °С со временем выдержки от 1 до 6 часов для чугунов химического состава и с исходной микроструктурой матрицы, указанных в табл. 1, твердость находилась в диапазоне 312–340 HB 5/1000/10, что соответствует нижнему уровню свойств марки СТБ ISO 17804/JS/1050-6 и меняется незначительно в сторону увеличения в ряду времени выдержки 1 ч → 3 ч → 6 ч.

Таблица 3

Твердость опытных образцов в зависимости от режима закалки

№ режима термообработки	Время выдержки, час	HB/1000/10
I	1	312–321
II	3	312–326
III	6	317–340

Результаты всех испытаний циклической долговечности в графическом виде представлены на рис. 1 и рис. 2.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы. Циклическая долговечность при температуре закалки и изотермической выдержке 350 °С при симметричном цикле напряжений «растяжение – сжатие» зависит от продолжительности выдержки и повышается в ряду времен 3 ч → 1 ч → 6 ч. При этом выявленная общая тенденция не является очевидной, поскольку, как видно на графике, при одних и тех же режиме термообработки и амплитуде нагружения значения количества циклов нагружения (циклическая долговечность) отличаются в десятки раз.

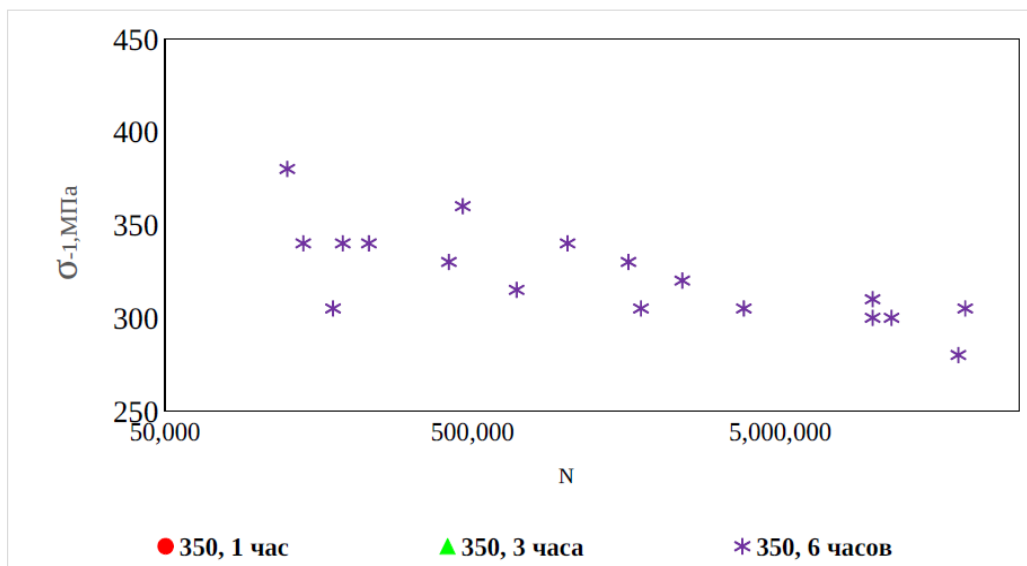


Рис. 1. Кривые усталости ИЗВЧ-350 °С

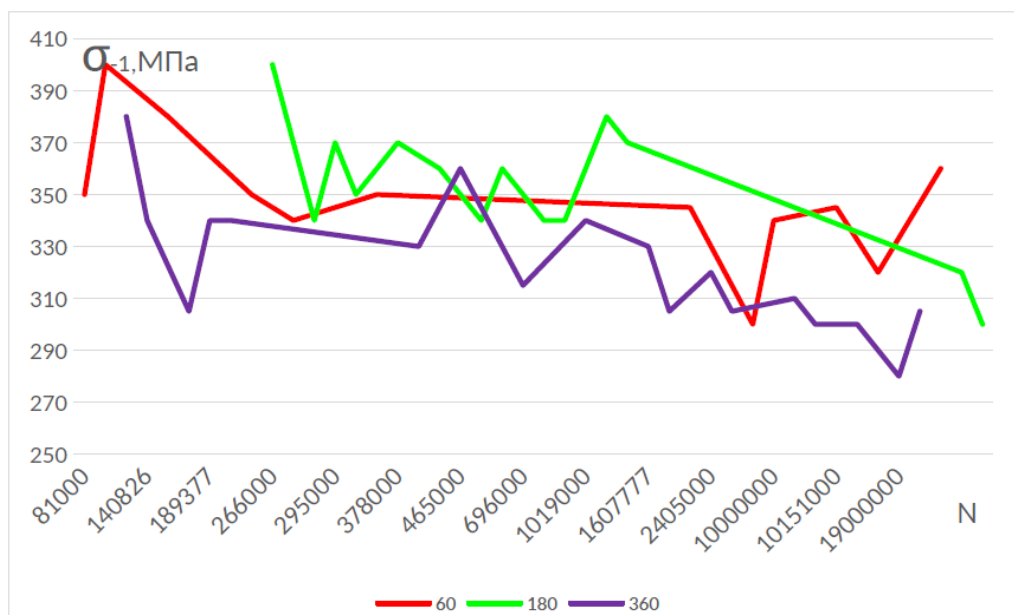


Рис. 2. График зависимости частоты нагружения от циклической стойкости

Таким образом, для подтверждения и объяснения выявленных тенденций исследования следует продолжить в направлении продолжения изучения влияния режимов закалки и структуры образцов, включая микроструктуру в объеме образцов и шероховатость, макро- и микроструктуру поверхности образцов, на циклическую долговечность ИЗВЧ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шерман, А.Д. Чугун: справ. издание / А.Д. Шерман; под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. – Москва: Металлургия, 1991. – 576 с.

2. Конструкторско-технологические решения производства поршней из чугуна с вермикулярным графитом для газопоршневых двигателей / В.В. Беков, И.В. Костылев, А.А. Павлов, В.А. Иванова // *Литейщик России*. – 2021. – № 2. – С. 9–12.
3. Макаренко, К.В. Изотермическая закалка – эффективный способ управления структурой и свойствами высокопрочного чугуна / К.В. Макаренко, Д.А. Илюшкин, Е.А. Зенцова // *Литейщик России*. – 2016. – № 4. – С. 10–14.
4. Полухин, М.С. Разработка и использование чугунов с шаровидным графитом с повышенными механическими и триботехническими свойствами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Полухин Максим Сергеевич. – Брянск, 2009. – 148 с.
5. Panov, A.G. About the Possibility of Increase in CGI Properties by Austempering / A.G. Panov, D.A. Gurtovoy, I.F. Shaekhova // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol. 284. – Pp. 224–228.
6. Dorazil, E. High Strength Austempered Ductile Cast Iron / E. Dorazil. – Ellis Horwood, 1991. – P. 226.
7. Vechet, S. Fatigue Properties of ADI in Dependence on the Time of Isothermal Transformation / S. Vechet, J. Kohout // *Mechanika*. – 1997: (235/97). – Pp. 127–130. – ISSN 0209-0848 55.
8. Academy Zanardi [Electronic resource]. – URL: <https://zanardifonderie.com/en/academy/properties-of-austempered-and-isothermal-ductile-irons/fatigue-properties-of-adi-and-idi-ductile-irons/> (accessed 30.01.2026) (in Russ.).
9. Покровский, А.И. Аусферритный (бейнитный) чугун: гармонизация международного стандарта ISO 17804 применительно к условиям Беларуси / А.И. Покровский, Б.Б. Хина, О.А. Толкачева // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 1. – С. 56–72.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ГРАНУЛЯТОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕКЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ В УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Пархоменко А.В.^{1✉}, аспирант, Амосов А.П.¹, д.ф.-м.н., профессор, Пастухов А.М.^{2,3}, аспирант

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² АОФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко,
г. Заречный, Пензенская обл., Российская Федерация

³ Пензенский государственный университет, г. Пенза, Российская Федерация

E-mail: parhomandr@gmail.com

Рассматриваются вопросы внедрения технологии инжекционного формования металлических порошков (Metal Injection Molding – MIM) на отечественном машиностроительном предприятии. Проведено технико-экономическое обоснование эффективности применения MIM-технологии в сравнении с традиционной механической обработкой для изготовления деталей приборов. Обоснована необходимость создания собственного производства гранулята на основе отечественных компонентов.

Ключевые слова: MIM-технология, металлический порошок, гранулят, полиформальдегид, инжекционное формование, экономическая эффективность, точность, импортозамещение

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE PRODUCTION OF DOMESTIC METAL-POLYMER FEEDSTOCKS FOR METAL INJECTION MOLDING TECHNOLOGY IN THE CONDITIONS OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

Parkhomenko A.V.^{1✉}, PhD student,

Amosov A.P.¹, Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor,

Pastukhov A.M.^{2,3}, PhD student

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

² FNPC Start named after M.V. Protsenko, Zarechny, Penza region, Russian Federation

³ Penza State University, Penza, Russian Federation

E-mail: parhomandr@gmail.com

This article examines the implementation of metal injection molding (MIM) technology at a domestic machine-building company. A feasibility study is conducted to compare the effectiveness of MIM technology with traditional machining for the manufacture of instrument components. The need for establishing in-house granulate production using domestically produced components is substantiated.

Keywords: MIM-technology, metal powder, granulate, polyformaldehyde, injection molding, cost-effectiveness, precision, import substitution

Современное машиностроение предъявляет высокие требования к снижению материалоемкости и себестоимости изготовления малогабаритных прецизионных деталей сложной формы. Одним из наиболее перспективных методов серийного производства малогабаритных деталей сложной формы является технология инжекционного формования металлических порошков – Metal Injection Moulding (MIM), сочетающая в себе производительность литья под давлением и высокие механические свойства изделий порошковой металлургии [1]. MIM-процесс позволяет достигать коэффициента использования материала до 99 %, что критически важно при работе с дорогостоящими легированными сталями и сплавами [2]. Несмотря на высокую эффективность, внедрение MIM-технологии в России сдерживается зависимостью от дорогостоящего импортного сырья (гранулята), ограниченностью марок материалов в предлагаемых на рынке гранулятах различных зарубежных фирм, отсутствием

производства отечественного сырья для МІМ. Таким образом, в условиях необходимости импортозамещения, особенно в стратегических отраслях машиностроения, разработка отечественных аналогов гранулятов на основе доступного сырья является приоритетной задачей.

Для решения данной задачи Самарским государственным техническим университетом (СамГТУ) была разработана технология производства МІМ-гранулятов на основе полиформальдегидного связующего [3–5], которая была рекомендована с целью применения для изготовления изделий по МІМ-технологии на промышленном предприятии АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко (г. Заречный).

В рамках совместных исследований СамГТУ и АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко была проведена сравнительная оценка эффективности перехода с традиционной механической обработки на МІМ-технологии.

В качестве объекта исследования были выбраны типовые детали приборов из различных марок сталей и сплавов, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики типовых деталей – представителей

Наименование	Материал	Вес детали, г	Годовой выпуск, шт.
Стопор	20×13	0,68	2000
Вкладыш	12Х18Н10Т	6,00	2000
Фланец	29НК	5,00	1500
Корпус	09Х16Н4Б	90,00	2000
Крышка	29НК	1,50	4000

Существующая на предприятии технология предусматривает изготовление деталей приборов из сортового проката с их последующей механообработкой. Такой метод характеризуется крайне низким коэффициентом использования материала, который варьируется в пределах от 5 до 30 %.

За прототип МІМ-процесса была взята технология переработки гранулята фирмы BASF (Германия) [6]. При расчете затрат на износ оснастки был принят 5-летний период эксплуатации пресс-форм; средняя трудоемкость изготовления литевой пресс-формы была принята составляющей 200 нормо-часов, а ее стоимость – 100 тысяч рублей. Амортизация оборудования рассчитывалась исходя из годового фонда работы оборудования в 5 тысяч часов.

В табл. 2 приведены сравнительные затраты на изготовление деталей по существующей на предприятии технологии и по МІМ-технологии.

Таблица 2

Сравнительная таблица основных затрат при изготовлении деталей по существующей и по МІМ-технологии

Наименование	Основные затраты при изготовлении по существующей технологии					Основные затраты по МІМ-технологии						
	Материал		Трудозатраты		Себестоимость, руб.	Материал		Трудозатраты		Износ оснастки, руб.	Амортизация оборудования, руб.	Себестоимость, руб.
	Норма расхода, гр.	Затраты, руб.	Трудоемкость, н/час	Зарплата, руб.		Норма расхода, гр.	Затраты, руб.	Трудоемкость, н/час	Зарплата, руб.			
Стопор	5,0	1,0	0,58	58	220	0,75	2,0	0,1	10	10	5,0	67
Вкладыш	30	7,5	1,3	130	520	7,0	18,0	0,2	20	10	10	138
Фланец	50	20	2,7	270	1438	6,0	15,0	0,25	25	13	10	163
Корпус	1800	540	6,8	680	2700	100	250	1,2	120	10	100	960
Крышка	5,0	2,0	0,22	22	80	2,0	5,0	0,02	2,0	5,0	5,0	25

На основании анализа были получены параметры снижения затрат, указанные в табл. 3.

**Сравнительные параметры снижения затрат
при изготовлении деталей по МІМ-технологии**

Наименование детали	Вес, г	Снижение затрат на ед., руб.	Удельное снижение, руб/г
Стопор	0,68	153	200
Вкладыш	6,00	382	55
Фланец	5,00	1275	212
Корпус	90,00	1740	17

Сравнительный анализ затрат показал значительное превосходство МІМ-технологии по сравнению с традиционной механической обработкой. Переход на МІМ-технологию обеспечивает удельное снижение затрат от 17 до 212 рублей на один грамм готового продукта. При перспективном годовом объеме производства до 5 тонн экономический эффект может достигать сотен миллионов рублей.

Определяющим фактором точности и качества продукции в МІМ-процессе является стабильность характеристик гранулята. Зависимость от импортных поставок гранулятов с усредненными свойствами создает риски для стабильной работы предприятия. Исследование взаимосвязи состава и свойств металлополимерного гранулята с требованиями, предъявляемыми к конечной продукции МІМ-процесса [7], позволило сделать вывод о необходимости реализации собственного производства отечественного гранулята как неотъемлемой составной части сквозного технологического цикла изготовления изделий путем инжекционного формования металлических порошков.

С учетом положительных результатов при разработке составов и технологии производства отечественного гранулята из порошка карбонильного железа и полиформальдегидного связующего [2], подтвердивших соответствие технологических свойств импортному грануляту, было принято решение о создании МІМ-производства на АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко. В настоящее время такое производство организовано. В состав данного производства также входит комплект оборудования для производства гранулята, что позволяет получать изделия с повышенной точностью (до качества h9).

В настоящее время по предложенной технологии производства гранулятов [2–5] на АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко изготавливаются детали из нескольких материалов для различных отраслей отечественной промышленности (см. рисунок).



Детали, изготавливаемые на АО «ФНПЦ «ПО «Старт» по МІМ-технологии

В ходе испытаний установлено, что полученные по МІМ-технологии из отечественных гранулятов детали по своим механическим свойствам не уступают другим традиционным методам обработки (табл. 4).

Таблица 4

**Механические свойства деталей из стали 09Х16Н4Б,
изготовленных по различным технологиям**

Технология получения изделий	Характеристика		
	Временное сопротивление σ_B , кгс/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %	Твердость по шкале HRC
Технология литья ГОСТ 977	Не менее 95	8	29–35
Прокат ГОСТ 5949	Не менее 100	8	Не менее 29
МІМ-технология ГОСТ Р 59651	Не менее 105	8	29–34

На основе технологических рекомендаций по методике определения реологических свойств и гомогенности полученных гранулятов на АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко освоены методы контроля качества гранулята, разработаны инструкции для работы на приборах.

Практическая реализация МІМ-технологии на промышленном предприятии демонстрирует успешное применение отечественных гранулятов, обеспечивающих высокое качество и точность продукции, значительное снижение себестоимости продукции и доказывает возможность реализации полностью независимого от импорта технологического цикла серийного производства малогабаритных металлических изделий сложной формы. Это подтверждает перспективность МІМ-технологии для широкого применения в различных отраслях промышленности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. German, R.M. Powder Metallurgy Science / R.M. German. – 2nd ed. – Princeton – New Jersey, USA: Metal Powder Industries Federation, 1994. – 472 p.
2. МІМ-технология как способ изготовления точных деталей из металлопорошковых композиций, в том числе титановых сплавов / А.И. Васильев, С.В. Путырский, А.Ю. Коротченко, А.Ю. Анисимова // Научно-технический журнал «Труды ВИАМ». – 2021. – № 3 – С. 16–27. – URL: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-3-16-27>
3. Разработка отечественного порошкового гранулята со связующим на основе полиформальдегида для МІМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук [и др.] // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – № 4. – С. 8–13. – Москва: Калвис, 2013. – URL: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2013-4-8-13>
4. Пархоменко, А.В. Разработка гранулята на полиформальдегидном связующем на основе порошка нержавеющей стали 09Х16Н4Б для МІМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.М. Пастухов // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия (электронная версия). – 2025. – Т. 19. – № 3. – С. 15–24. – URL: <https://dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2025-3-15-24>
5. Пархоменко, А.В. Разработка и применение гранулята на основе порошка нержавеющей стали 12Х18Н10Т для МІМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.М. Пастухов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2025. – № 3 (53). – С. 73–81. – URL: [https://dx.doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-73-81](https://dx.doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-73-81)
6. Грабой, И.Э. Материалы Catamold ® компании BASF для литья под давлением / И.Э. Грабой, А. Thom // Новые материалы и изделия из металлических порошков. Технология. Производство. Применение: сборник трудов научно-практического семинара (ТПП – ПМ 2005), 21–24 июня 2005 г., Йошкар-Ола. – Йошкар-Ола, 2005. – С. 37–40.
7. Пархоменко, А.В. Влияние состава связующего в грануляте на повышение точности изделий при изготовлении по МІМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении: сборник материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пермь, 2024. – С. 209–212.

ПРОПИТЫВАНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Поздеева А.Ю.^{1,2✉}, аспирант, научный сотрудник, **Амосов А.П.**¹, д.ф.-м.н., профессор,
Юдин П.Е.^{1,2}, к.т.н., доцент, директор по науке

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² ООО «Научно-производственный центр «Самара», г. Самара, Российская Федерация

E-mail: pozdeeva@npcsamara.ru

Представлены результаты герметизации открытой пористости газотермического покрытия, нанесенного методом электродуговой металлизации, с применением металлических пропитывающих материалов на основе латуни Л63 и алюминия. Показано формирование плотного, хорошо сцепленного с покрытием металлического слоя, который существенно повышает барьерные свойства и обеспечивает защиту оборудования. Эффективность применения пропиточных материалов оценена методом поляризационных кривых Тафеля и заключается в повышении коррозионной стойкости покрытия на 77 %.

Ключевые слова: коррозия, износ, пористость, инфильтрация, газотермическое покрытие, поляризационные кривые Тафеля

IMPREGNATION OF THERMAL SPRAY COATING WITH METAL MATERIALS

Pozdeeva A.Yu.^{1,2✉}, PhD student, researcher,
Amosov A.P.¹, Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Yudin P.E.^{1,2}, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, scientific director

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

² LLC "Research and Production Center "Samara", Samara, Russian Federation

E-mail: pozdeeva@npcsamara.ru

The article presents the results of sealing the open porosity of a thermal spray coating, applied by electric arc metallizing, using metallic impregnating materials based on L63 brass and aluminum. The formation of a dense, well-adhered metallic layer is demonstrated, significantly improving the barrier properties and providing equipment protection. The effectiveness of the impregnating materials, assessed using Tafel polarization curves, demonstrates a 77 % increase in coating corrosion resistance.

Keywords: corrosion, wear, porosity, infiltration, thermal spray coating, Tafel polarization curves

В процессе эксплуатации рабочие поверхности промышленного оборудования подвергаются износу и коррозии, которые приводят к их повреждению и остановки в работе. Повышение стойкости поверхности к воздействию агрессивных факторов рабочей среды является ключевым подходом к продлению срока службы оборудования. С целью изначального улучшения характеристик и восстановления уже изношенных поверхностей широкое применение получили методы газотермического напыления [1]. Газотермическое напыление является технологическим процессом формирования покрытий, при котором металлические или неметаллические порошки, расплавляемые под действием высокой температуры, наносятся потоком на предварительно подготовленную поверхность, создавая прочное, коррозионно- и износостойкое покрытие. В промышленных масштабах наибольшее распространение получили два основных способа напыления: электродуговая металлизация и высокоскоростное газопламенное напыление. Структура напыленного покрытия по природе своего формирования характеризуется пористостью, которая отрицательно сказывается на защитных и барьерных характеристиках покрытия [2]. Для снижения ее неблагоприятного воздействия приме-

няют пропитку газотермических слоев полимерными составами, неорганическими растворами и металлическими материалами [3]. Выбор пропитывающего материала определяется характером агрессивной среды и условиями эксплуатации оборудования с газотермическим покрытием. В случаях одновременного воздействия коррозионных процессов и изнашивания, а также воздействия повышенных температур наиболее рациональным является использование металлических пропиток. При этом процесс инфильтрации сопровождается нагревом до температуры плавления пропитывающего материала, что активизирует диффузионные взаимодействия между частицами покрытия и приводит к повышению его адгезии с подложкой, а также способствует выравниванию микроструктуры покрытия [4]. При этом необходимо исследовать химическое взаимодействие компонентов покрытия и пропитки на предмет отсутствия образования хрупких интерметаллидных фаз.

В данной работе представлены результаты сравнительного экспериментального исследования металлизационного покрытия из нержавеющей стали марки ПП-ЗСМ-500 (состава 07X18H8M5C5Г4Б). В качестве подложки применяли плоские образцы из стали 20 размером 150×70×5 мм. Напыление осуществляли методом электродуговой металлизации порошковой проволокой диаметром 2 мм. В качестве пропиточных материалов использовали латунь Л63 в виде листов толщиной 0,5 мм, уложенных в три слоя, а также алюминий в форме фольги толщиной 0,014 мм, нанесенной в шесть слоев (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав пропиточных материалов

Материал	Содержание, вес %
Лист Л63	Cu ~ 63 %, Zn ~ 35
Фольга Al	Al ~ 99 %, примеси Fe, Si

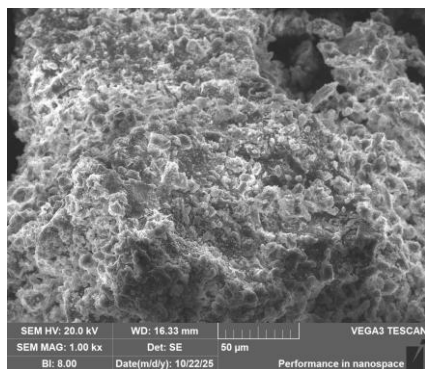
Подготовка поверхности газотермического покрытия перед проведением инфильтрации заключалась в промывке его щелочным моющим средством с добавлением ПАВ, обезжиривании ацетоном и последующей сушке при температуре 60 °С в течение трех часов.

Для предотвращения образования оксидных пленок в процессе нагрева использовали порошковые флюсовые материалы. При инфильтрации латуни применялся флюс ПВ-209 массой порошка 5 г. Данный флюс относится к высокотемпературным и широко применяется при пайке меди и нержавеющей стали. Активное действие флюса проявляется в интервале температур 700–900 °С. В состав флюса по данным производителя входят фтористый калий KF (41–43 %), оксид бора B₂O₃ (34–36 %) и тетрафторборат калия KBF₄ (22–24 %).

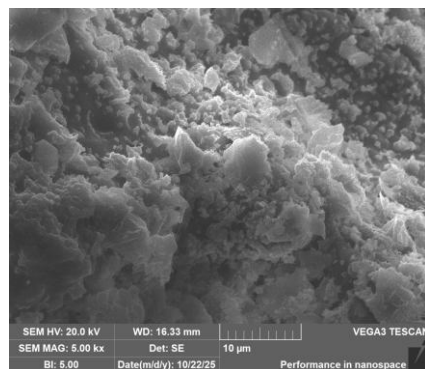
Для алюминиевой фольги использовался флюс NocolokTM массой порошка 7 г. Температура его плавления находится в диапазоне 565–570 °С. По данным производителя флюс представляет собой смесь солей KAlF₄ и KAlF₆ с обобщенной формулой K₁₋₃AlF₄₋₆. Массовая доля основного вещества составляет ~99 %. Применяется для пайки алюминия, химически активен только в расплавленном состоянии. Вид флюсов представлен на рис. 1.

Листовой пропитывающий материал распределяли по всей поверхности газотермического покрытия, флюс наносили поверх листов. С целью определения влияния приложенной внешней нагрузки на одну из половин поверхности образцов, обработанных пропиточным материалом и флюсом, оказывали давление с использованием плоского графитового груза массой 3,5 кг, что соответствовало давлению порядка 6,7 кПа, тогда как противоположная часть пластин оставалась ненагруженной.

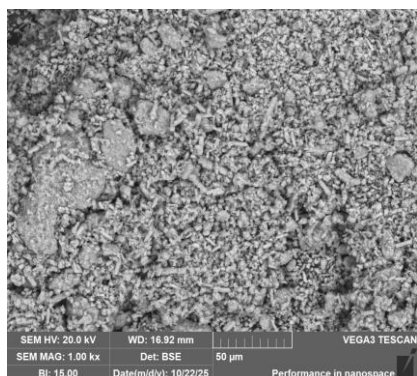
Термическую обработку проводили в воздушной среде с использованием муфельной печи: для латунной пропитки температура нагрева составляла 1100 °С, для алюминиевой – 800 °С. Образцы выдерживали при заданных температурах в течение 30 минут, после чего осуществляли охлаждение вместе с печью до 400 °С с последующим охлаждением на воздухе. Газотермическое покрытие пластин с нанесенными пропиточными материалами до и после термического воздействия представлено на рис. 2.



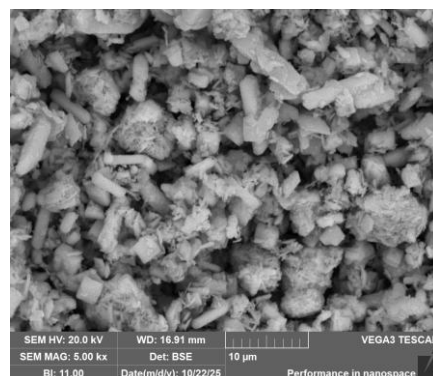
a



б



в



г

Рис. 1. Внешний вид материалов для пропитки:
a-б – флюс ПВ-209; *в-г* – флюс Nocolok™

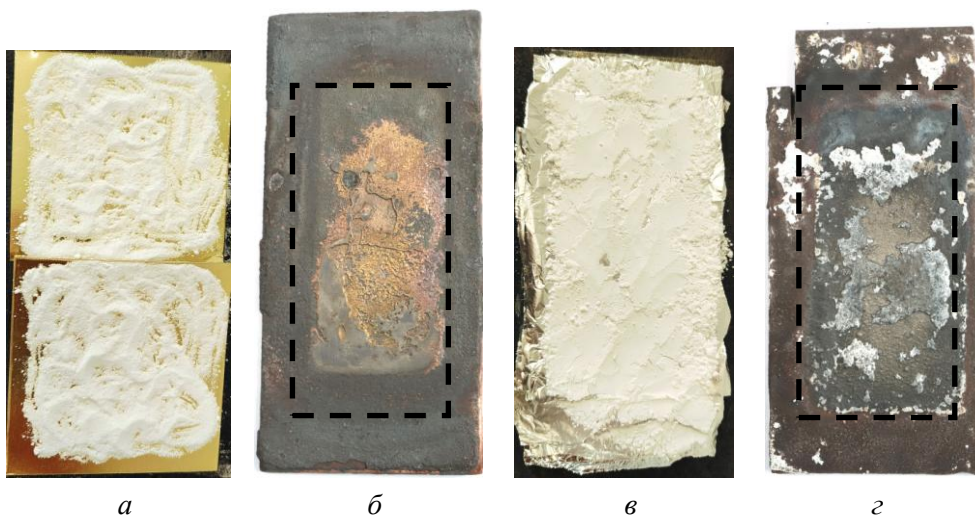


Рис. 2. Газотермическое покрытие с пропиточными материалами
до (*a, в*) и после (*б, г*) нагрева, охлаждения и снятия графитового груза,
пунктиром выделена область расположения груза:
a-б – латунь Л63; *в-г* – алюминий

По завершении термической обработки и последующего охлаждения образца с латунью Л63 (рис. 2, *б*) по всей поверхности зафиксировано полное расплавление пропиточного материала, сопровождающееся его частичным стеканием за пределы пластины. В результате сформировался сплошной слой характерного медного оттенка, обладающий высокой адгезией к газотермическому покрытию, что указывает на удовлетворительную смачиваемость поверхности покрытия материалом пропитки.

Для образца с алюминием на участке покрытия, не подвергавшемся воздействию груза, после охлаждения наблюдалось образование укрупненных металлических включений серого

цвета, обусловленное действием сил поверхностного натяжения расплава. При этом отмечались участки, не заполненные пропиточным материалом. В области образца, находившейся под нагрузкой, сформировался сплошной слой серого цвета с переменной толщиной. Как отдельные частицы, так и сформированный слой характеризуются прочным сцеплением с поверхностью газотермического покрытия как в нагруженной, так и в открытой области и не удаляются при механическом воздействии металлической щеткой, что свидетельствует о химическом взаимодействии материала покрытия с алюминием.

Оценку результативности герметизации открытой пористости проводили по изменению скорости коррозии покрытия. Данный параметр определяли посредством построения и анализа поляризационных Тафелевских кривых [5]. Испытания проводили в стандартной трех-электродной электрохимической ячейке: в качестве рабочего электрода использовали пластину с нанесенным покрытием, электродом сравнения служил насыщенный хлорсеребряный электрод, а вспомогательный электрод был изготовлен из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т [6]. Электрохимические исследования выполняли с применением потенциостатического комплекса, предназначенного для коррозионных испытаний на базе потенциостата IPC-ProMF, оснащенного специализированным программным обеспечением, разработанным в ИФХЭ РАН (г. Москва).

Регистрацию тафелевских кривых осуществляли при скорости изменения потенциала 10 мВ/с в интервале от -1300 до 0 мВ (рис. 3). По пересечению линейных участков анодной и катодной ветвей тафелевских кривых определяли параметры коррозионного процесса – значения плотности коррозионного тока $i_{корр}$ и коррозионного потенциала $E_{корр}$. В табл. 2 представлены обобщенные результаты расчетов.

Таблица 2

Параметры электрохимической коррозии покрытия

Покрытие	R_p , кОм·см ²	$E_{корр}$, мВ	$i_{корр}$, мА/см ²	$V_{корр}$, мм/год	Эффективность
До пропитки	0,294	-887	97,4	1,14	–
Пропитка Л63	0,711	-598	25,7	0,30	74 %
Пропитка Al	1,195	-972	22,3	0,26	77 %

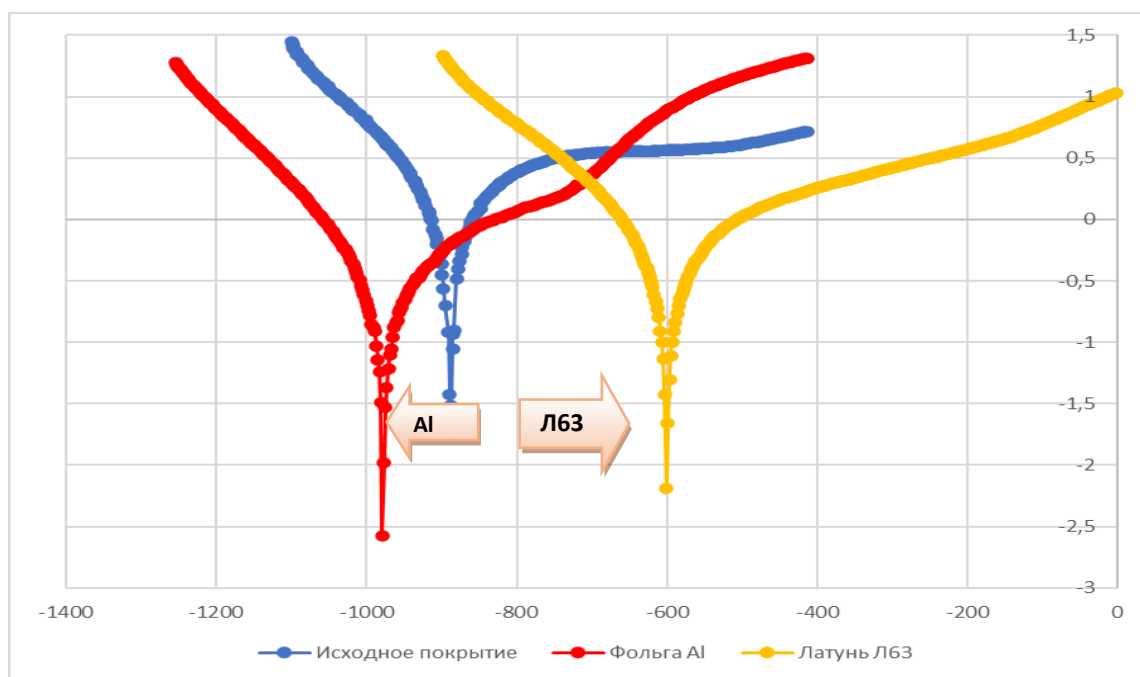


Рис. 3. Тафелевские кривые для металлизационных покрытий в исходном состоянии и после пропитки

Анализ полученных данных показывает, что обработка газотермического покрытия методом пропитки приводит к росту его коррозионной стойкости, что проявляется в снижении плотности коррозионного тока $i_{\text{корр}}$ и одновременном увеличении значения поляризационного сопротивления R_p . При этом скорость коррозионного разрушения покрытия, подвергнутого латунной пропитке, уменьшается на 74 %, тогда как при использовании алюминия данный показатель снижается на 77 %.

Величина потенциала коррозии $E_{\text{корр}}$ смещается как в положительную, так и в отрицательную сторону, что связано с собственным потенциалом материала пропитки. Согласно электрохимическому ряду напряжений металлов, алюминий имеет более электроотрицательный потенциал (около -1,7 В), а нержавеющая сталь – более положительный (в пассивном состоянии). Эта разница в потенциалах создает движущую силу для гальванической коррозии, когда оба металла находятся в контакте в присутствии электролита (например, обводненной нефтяной эмульсии). В случае наличия в слое алюминия повреждений, несплошностей, корродировать будет алюминий. В образовавшейся гальванической паре алюминий выступает в роли анода, а нержавеющая сталь – катода. В паре латунь – нержавеющая сталь в условиях влажной среды или электролита ситуация с коррозией будет обратной той, что с алюминием и разрушаться будет нержавеющая сталь – металлизационное покрытие. Таким образом, в условиях эксплуатации с высоким содержанием механических частиц и большой вероятностью повреждения целостности слоя пропитки для нержавеющего покрытия применение алюминиевого материала является предпочтительным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Carbide-based thermal spray coatings: A review on performance characteristics and post-treatment / A. Govande, A. Chandak, B. Sunil, R. Dumpala // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – Vol. 103. – Art. 105772. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105772.
2. Структура и свойства стальных покрытий, нанесенных методом активированной дуговой металлизации / Ю.С. Коробов, А.М. Полякова, И.Л. Яковлева [и др.] // Сварочное производство. – 1997. – № 1. – С. 4–6.
3. Поздеева, А.Ю. Материалы для пропитки пористых металлизационных газотермических антикоррозионных покрытий погружного нефтепромыслового оборудования. Часть 1 / А.Ю. Поздеева, А.П. Амосов, П.Е. Юдин // Нефтегазовое дело. – 2024. – № 22 (2). – С. 156–164. – DOI: 10.17122/ngdelo-2024-2-156-164.
4. Балдаев, Л.Х. Газотермическое напыление / Л.Х. Балдаев. – Москва: Старая Басманная, 2015. – 539 с.
5. Kasatkin, V.E. Monitoring of metal corrosion by electrochemical methods / V.E. Kasatkin // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2024. – Vol. 13. – No. 3. – Pp. 1482–1500. – DOI: 10.17675/2305-6894-2024-13-3-7.
6. Максимук, А.В. Применение электрохимической ячейки высокого давления в комплексе с методом поляризационных кривых Тафеля для оценки антикоррозионных свойств внутренних покрытий насосно-компрессорных труб / А.В. Максимук, Д.В. Берков, А.П. Амосов // Современные инновации в технике и технологиях: сборник научных статей Международной научно-технической конференции, Воронеж, 18 ноября 2025 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 186–196.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ УЧАСТКОВ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА, ПОСТРАДАВШИХ ОТ КОРРОЗИИ, ПУТЕМ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТНЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

Полтаракова Р.А. [✉], студент, Ильященко Д.П., доцент, к.т.н., доцент

*Юргинский технологический институт Томского политехнического университета,
г. Юрга, Российская Федерация
E-mail: mita8@tpu.ru*

Для решения проблемы коррозионных повреждений магистральных нефтепроводов предложен метод восстановления с использованием дуговой сварки плавлением. Инверторные источники питания обеспечивают превосходное качество ремонтных швов благодаря мелкокапельному переносу электродного металла, что минимизирует дефекты и продлевает срок службы трубопровода.

Ключевые слова: ручная дуговая сварка, покрытые электроды, источник питания, дефекты

RESTORATION OF CORROSION-DAMAGED MAIN PIPELINE SECTIONS BY REPAIR WORK USING ARC FUSION WELDING

Poltarakova R.A., student,
Ilyashchenko D.P., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Yurginsky Institute of Technology of Tomsk Polytechnic University, Yurga, Russian Federation
E-mail: mita8@tpu.ru*

To solve the problem of corrosion damage to main oil pipelines, this article proposes a restoration method using arc fusion welding. Inverter power sources provide excellent weld repair quality thanks to fine-droplet transfer of electrode metal, which minimizes defects and extends the service life of the pipeline.

Keywords: manual arc welding, exposed electrodes, power source, defects

Фундаментом устойчивого развития любой энергетической отрасли является обеспечение непрерывности производственных процессов. Это, в свою очередь, предполагает поддержание работоспособности установленного на производственных площадках оборудования. Эффективность и экономичность эксплуатации оборудования, а также его долговечность и ремонтпригодность напрямую коррелируют с уровнем развития и применения технологий, способствующих минимизации временных, трудовых и финансовых затрат при одновременном обеспечении высокого уровня промышленной безопасности.

В контексте вышеизложенного трубопроводный транспорт нефти и газа представляет собой отрасль, требующую активной разработки и внедрения инновационных технологий для гарантирования бесперебойной работы оборудования. Данное направление исследований также включает в себя разработку технологий, учитывающих влияние параметров и состава потоков нефти и газа на функционирование магистральных трубопроводов.

В процессе эксплуатации магистральных трубопроводов в их теле и на поверхности образуется множество дефектов, требующих проведения ремонтных работ. Существующие методы ремонта включают в себя резку, шлифовку, сварку, применение муфт различных конструкций и патрубков с эллиптическим дном. Тем не менее вырезка дефектного участка с последующей его заменой является универсальным методом ремонта, применимым для устранения любых типов дефектов. Выбор способа сварки при проведении ремонтных работ в ПАО «Газпром» регламентируется данными научно-технической документации [1] или аналогичным актуальным корпоративным стандартом компании и зависит от конкретных условий, таких как тип соединения, толщина металла, пространственное положение сварки и квалификация сварщика. Хотя, согласно НТД, существует негласное требование

к применению максимально механизированных и автоматизированных методов сварки, их внедрение осложняется рядом факторов. К ним относятся: крупногабаритность оборудования, необходимость аттестации персонала, оснащения и технологий, а также не всегда подходящие условия для их использования (рис. 1). В результате выбор метода сварки часто диктуется именно этими ограничениями, что приводит к сохранению доминирующей роли ручной дуговой сварки (РДС). Таким образом, повышение эффективности применения РДС при проведении ремонтных работ является актуальной задачей.



Рис. 1. Фото с места проведения ремонтных работ

Согласно результатам исследований В.Д. Макаренко и соавторов [2, 3], снижение размеров переносимых капель (рис. 2) электродного металла является ключевым фактором для достижения заданных критериев качества сварных швов. Такой подход позволяет избежать дефектов [4, 5], улучшить пластичность и, как следствие, повысить ударную вязкость материала при эксплуатации в условиях низких температур.

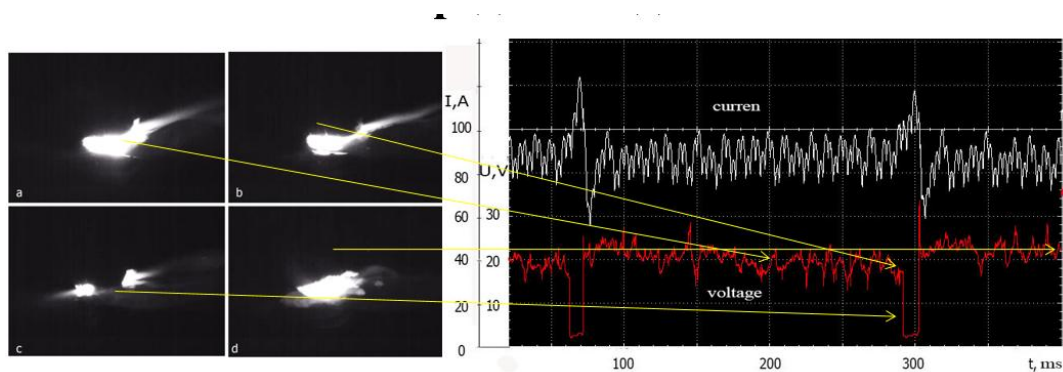


Рис. 2. Кинограммы каплепереноса электродного металла и осциллограммы тока в сварочной цепи и напряжения между электродом и изделием:
a – начало формирования капли на поверхности покрытого электрода;
b – нарастание капли жидкого металла на поверхности электрода;
c – переход капли с поверхности электрода в сварочную ванну с замыканием дугового промежутка; *d* – процесс начала зарождения последующей капли

Цель работы: повышение эффективности ремонта магистральных газопроводов.

Задача: провести экспериментальные исследования для определения оптимальных условий ручной дуговой сварки (РДС), способствующих минимизации размеров капель переносимого электродного металла.

Оценку стабильности процесса сварки осуществляли с помощью статической обработки осциллограмм сварочного тока и напряжения от инверторного, диодного и однофазного выпрямителей (см. рис. 2) по разработанной ранее методике [6], результаты которой представлены в виде диаграмм на рис. 3.

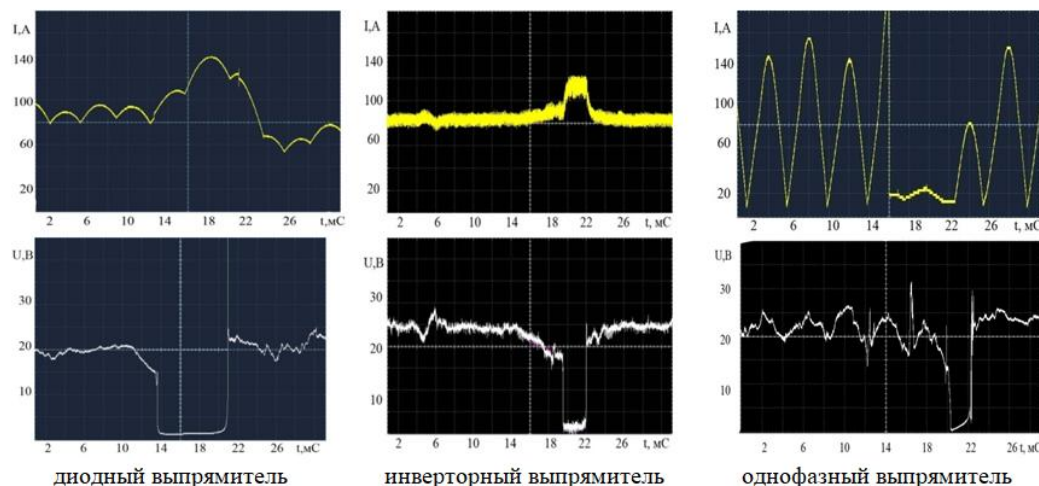


Рис. 3. Осциллограммы тока в сварочной цепи и напряжения между электродом и изделием (электроды марки LB-52U, диаметр 3,2 мм)

Осциллограммы получены с использованием осциллографа цифрового запоминающего АКИП-4122/1V; дифференциального пробника PintekElectronics DP-50; съемника currentprobe PR 1030; программы OWON_Oscilloscope_2.0.8.26.

Результаты исследования (см. рис. 3) демонстрируют, что применение инверторного выпрямителя приводит к уменьшению продолжительности короткого замыкания дуги при неизменных параметрах наплавки. Данный факт подтверждает преимущества инверторной технологии перед диодными и однофазными аналогами, что, вероятно, обусловлено более дисперсным переносом материала электрода. Установлено, что использование инверторного выпрямителя по сравнению с традиционно применяемыми диодными выпрямителями обеспечивает снижение средней длительности горения дуги на интервалах плавления электрода и уменьшение размеров формируемых капель электродного металла в среднем на 36 %, что способствует уменьшению перегрева свариваемого изделия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТО Газпром 15-1.1-002-2023 «Технологии сварки промышленных и магистральных трубопроводов», утвержден и введен в действие Распоряжением ПАО «Газпром» от 24.01.2023 г. № 22.
2. Технологические свойства монтажной сварки трубопроводов / В.Д. Макаренко, Р.В. Палий, М.Ю. Мухин [и др.]; под ред. В.Д. Макаренко. – Москва: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2001. – 118 с.
3. Макаренко, В.Д. Особенности ручной дуговой сварки корневых швов неповоротных стыков нефтепроводов, эксплуатируемых в условиях Западной Сибири / В.Д. Макаренко, К.А. Муравьев, А.И. Калянов // Сварочное производство. – 2005. – № 12. – С. 38–41.
4. Мамадалиев, Р.А. Инновационные методы сварки трубопроводов и сложных конструкций для обеспечения коррозионной устойчивости металла шва в агрессивных средах / Р.А. Мамадалиев // Тюменский научный журнал. – 2024. – № 3 (3). – С. 22–25.
5. Сварка при строительстве и ремонте линейной части магистральных трубопроводов: учебное пособие [Электронный ресурс] / В.И. Берг, Р.А. Мамадалиев, В.О. Довбыш, О.Ю. Теплоухов. – Тюмень: ТИУ, 2023. – 159 с. – ISBN 978-5-9961-3043-6. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/364124> (дата обращения: 19.02.2026).
6. Il'yashchenko, D.P. The Effect of Energy Parameters of Power Sources on the Structure and Properties of Permanent Joints at Manual Arc Welding / D.P. Il'yashchenko, D.A. Chinakhov, E.V. Lavrova // Metals. – 2024. – Vol. 14. – Art. 759. – URL: <https://doi.org/10.3390/met14070759>

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛИКОЛЯ ДЛЯ ГРАНУЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ ФОРМОВОЧНОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ СТЕКЛОПЛАСТИКА

Романова Н.В. , к.т.н., доцент, **Шафигуллин Л.Н.**, к.т.н., доцент,
Габдрахманов А.Т., к.т.н., доцент, **Насыров И.А.**, аспирант

*Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета,
г. Набережные Челны, Российская Федерация
E-mail: romnata@yandex.ru*

Представлены результаты работ по получению и применению наполненных композиций на основе полиэтилентерефталатгликоля (PETG) для технологии гранульной 3D-печати. Показана перспективность использования 3D-печати разработанных материалов для изготовления формовочной оснастки, применяемой при вакуумной формовке композитов.

Ключевые слова: 3D-печать, формовочная оснастка, полимерные композиции

POLYMER COMPOSITE OF POLYETHYLENTEREPHTHALATE GLYCOL FOR PELLET 3D PRINTING OF MOLDS FOR COMPOSITES FABRICATION

Romanova N.V. , PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Shafigullin L.N., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Gabdrakhmanov A.T., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Nasyrov I.A., PhD student

*Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University,
Naberezhnye Chelny, Russian Federation
E-mail: romnata@yandex.ru*

Results on the production and application of filled polyethylene terephthalate glycol (PETG)-based composites for granular 3D printing technology are presented. The potential for using 3D printing of the developed materials for the manufacture of molding tooling for vacuum forming of composites is demonstrated.

Keywords: 3D printing, molding tools, polymer composites

В последние годы набирает популярность применение гранул на основе термопластичных полимеров в технологии 3D-печати. В широко распространенной FDM-технологии (Fused Deposition Modeling) для 3D-печати применяются филаменты, но в новом методе, известном как Fused Granulate Fabrication (FGF), используются термопласты в форме гранул для изготовления деталей слой за слоем.

FGF-технология используется в различных отраслях промышленности, таких как автомобилестроение, строительство, медицина. Одним из перспективных направлений применения данной технологии является изготовление формовочной оснастки для формования стеклопластика в машиностроении благодаря высокой производительности, доступности материалов, а также использование гранул из повторно переработанных полимеров, благодаря чему снижается конечная стоимость изделия из-за низкой цены материала и сокращения времени производства. Традиционные формы для производства стеклопластика обычно изготавливают из металлических материалов, производство которых предполагает значительные трудозатраты и длительные сроки изготовления. Применение 3D-технологии не только позволяет сократить стоимость и время изготовления, но обеспечивает гибкость в проектировании. Таким образом, FGF является наиболее пригодной технологией для производства единичной и крупногабаритной формовочной оснастки, изготовление которой другими способами является экономически нецелесообразным.

Для производства формовочной оснастки с помощью 3D-печати применяются такие термопласты, как акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), поликарбонат (PC), полиэтилен-терефталатгликоль (PETG), полимеры на основе полиэфиримида благодаря показателям их термостабильности и механическим свойствам [1, 2]. Для формовочной оснастки, используемой при формовании стеклопластика, необходимо выбрать наиболее подходящий материал, который помимо долговечности и термомеханической устойчивости в течение нескольких циклов производства обеспечивает возможность изъятия изделия из формы. Для этого рекомендуется применение PETG, поскольку он обладает хорошей способностью отделяться от эпоксидной смолы [1, 3]. Разработка и применение полимерных композиционных на основе PETG с различными видами наполнителей позволит не только улучшить свойства термопластичной матрицы, но и снизить стоимостные характеристики материала для 3D-печати. К тому же ужесточение требований к экологической безопасности полимерных композиций диктует условия необходимости использования в качестве наполнителей отходов стеклопластика и продуктов растительного происхождения. В этой связи актуальной задачей является расширение ассортимента материалов для 3D-печати формовочной оснастки, применяемой при формовании стеклопластика с высокими экономическими и экологическими показателями.

Целью исследований является разработка материалов на основе наполненных композиций PETG и целесообразность применения их при FGF-печати формовочной оснастки для формования стеклопластика.

Композиции для FGF-печати получали с помощью экструдера Welber EXL-22DF с применением системы стабилизаторов Juapox-168 и Juapox-1010 производства ГК «ENC» [4, 5], суперконцентрата SO05TY производства ГК «Алеко» [6] для улучшения переработки и компонента OKABOND 7290-110 производства ООО «ОКАПОЛ» [7] для улучшения адгезии между наполнителем и полимером по разработанной рецептуре, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Состав композиций

Компонент, вес. частей	Образец			
	PETG-G10	PETG-G20	PETG-F5	PETG-F10
PETG	100	100	100	100
Отходы стеклопластика	10	20		
Порошок льна			5	20
Система стабилизаторов	0,5	0,5	0,5	0,5
Скользкая добавка SO05TY	0,5	0,5	0,5	0,5
OKABOND 7290-110	4	4	4	4

Материал PETG для 3D-печати обладает достаточно высокими прочностными характеристиками, негигроскопичен, что важно для технологии, поэтому в предварительной сушке перед 3D-печатью нет необходимости; стоек к кислотам, щелочам, ультрафиолетовому воздействию, что позволяет его применять для изделий, работающих в контакте с агрессивными средами и на открытом воздухе. PETG достаточно термоустойчивый материал и выдерживает температуру до 80 °С, иногда и выше, не теряя формы. Физико-механические характеристики PETG и композиций на его основе с отходами стеклопластика и порошком льна в качестве наполнителей представлены в табл. 2.

Анализ табл. 2 показал, что введение отходов стеклопластика до 20 % и порошка льна до 10 % приводит к снижению показателей прочности при растяжении на 30 % и прочности при изгибе на 35 % соответственно, при этом наблюдается увеличение ударной вязкости в несколько раз. Следовательно, применение наполнителей приводит к улучшению ударных характеристик. Испытания в условиях влажности, температуры до плюс 60 °С и ультрафиолетового облучения показали сохранение физико-механических свойств без значительного снижения показателя твердости и прочности при растяжении, то есть материалы не подвержены влиянию влажной среды и ультрафиолетовому воздействию и могут эксплуатироваться при постоянной температуре при плюс 60 °С длительное время без изменения свойств.

Свойства композиций

Показатель	Образец				
	PETG	PETGG10	PETGG20	PETGF5	PETGF10
Прочность при растяжении, МПа	52	38	36	42	37
Ударная вязкость по Шарпи без надреза, кДж/м ²					
– при +20 °С	8	68	54	16	13
– при -40 °С	5	47	48	14	12
Прочность при изгибе, МПа	67	44	43	50	50
Твердость по Шор D, усл. ед.	94	92	91	91	92
Твердость по Шор D после старения в течение 6 ч, усл. ед.					
– при 25 °С и относительной влажности 100 %	95	93	91	94	93
– при +60 °С	94	90	94	95	91
– при УФ-облучении	91	94	96	92	93
Прочность при растяжении, МПа, после старения в течение 6 ч, усл. ед.					
– при 25 °С и относительной влажности 100 %	54	40	38	42	35
– при +60 °С	63	41	40	40	37
– при УФ-облучении	57	39	37	42	41

Полученные образцы материалов были использованы для 3D-печати с помощью FGF-принтера. Режимы FGF-печати композиций на основе PETG представлены в табл. 3. Следует отметить, что преимуществом 3D-печати композиций на основе PETG является стойкость материала к перепадам температур, что позволяет печатать в открытой камере. Температурные режимы для PETG и всех образцов композиций PETG с порошками льна и отходов стеклопластика до 10 % одинаковы с максимальной температурой зон экструдера до 235 °С. При увеличении содержания наполнителя необходимо повышать температуру до 240 °С, поскольку стекловолоконный наполнитель способен увеличивать температуростойкость полимерных композиций.

Таблица 3

Технологические параметры FGF-печати композиций на основе PETG

Образец	Температурные режимы нагрева, °С			Тип камеры	Температура камеры, °С	Адгезивные средства
	Зона 3	Зона 2	Зона 1			
PETG-F5	80	235	235	Открытый	80	Лак (усадка)
PETG-F10	80	235	235	Открытый	80	Лак (усадка)
PETG-G10	80	235	235	Открытый	80	Лак (усадка)
PETG-G20	80	235	240	Открытый	80	Лак (усадка)

При проектировании формовочной оснастки для формовки стеклопластика были учтены требования к углу съема, минимальным радиусам, наличию направляющих выемок для обеспечения эффективного технологического процесса формовки. Все это позволило изготовить формовочную оснастку на основе PETG (образец PETG-G10). Внешний вид оснастки представлен на рисунке. Полученный образец характеризуется качественным внешним видом без дефектов, расслоений рабочей части оснастки, используемой для формования.

Следовательно, полученные образцы материалов пригодны для изготовления форм для производства композитов благодаря гладкой поверхности с низкой адгезией.

Таким образом, применение 3D-печати на основе разработанных материалов для изготовления формовочной оснастки, используемой при производстве стеклопластика, имеет значительные преимущества по сравнению с традиционной технологией, позволяя создавать уникальные варианты дизайна, которые могут адаптироваться к требованиям применения и потребностям заказчика и при этом обеспечивают низкие затраты и сокращают сроки.



Внешний вид образца формовочной оснастки

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторской диссертации и выполнению научно-исследовательских работ (соглашение № 12/2025-ПД-КФУ от 22.12.2025 г.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pelin, G. The Use of Additive Manufacturing Techniques in the Development of Polymeric Molds: A Review Polymers / G. Pelin, M. Sonmez, C.E. Pelin // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – No. 8. – Art. 1055. – DOI: 10.3390/polym16081055
2. Investigation of In-Autoclave Additive Manufacturing Composite Tooling Lindahl / V. Kunc, R. Dinwiddie, B. Post [et al.]. – Anaheim, CA, USA: CAMX, 2016.
3. Наумов Виктор. Аддитивное производство формовочной оснастки из полимерных и композитных материалов [Электронный ресурс]. – URL: <https://blog.iqb.ru/polymer-molding-3d-printing/>
4. Официальный сайт ГК «ЕТС» [Электронный ресурс]. – URL: <https://utsrus.com/antioksidant-jyapox-168-1106/> (дата обращения: 15.03.2025).
5. Официальный сайт ГК «ЕТС» [Электронный ресурс]. – URL: <https://utsrus.com/antioksidant-jyapox-1010-1101/> (дата обращения: 15.03.2025).
6. Официальный сайт ГК «Алеко» [Электронный ресурс]. – URL: <https://alen-rus.com/catalog/sliding/> (дата обращения: 15.03.2025).
7. Официальный сайт ООО «ОКАПОЛ» [Электронный ресурс]. – URL: <https://okapol.ru/product/aktivator-adgezii-poliolefinov/> (дата обращения: 15.03.2025).

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ОБРАЗЦОВ ЧЕРЕЗ ИСПЫТАНИЕ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ

Разживин В.А., ассистент, **Фадеев И.П.**, аспирант, **Ковалева Д.А.**, студент,
Глушечков В.А., к.т.н., доцент

*Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
г. Самара, Российская Федерация
E-mail: imp@ssau.ru*

Для оценки напряженно-деформированного состояния материала образцов использовались методики их испытания на растяжение и на микротвердость, позволяющие установить связь напряженно-деформированного состояния материала с микротвердостью по Виккерсу. С этой целью построены тарировочные графики $HV = f(\sigma, \epsilon)$ для образцов из алюминиевых, титановых сплавов и нержавеющей стали. Методика испытания на растяжение и микротвердость предполагает применение образцов двух типов: одного по ГОСТу-1497-84, другого – ступенчатого с различными площадями поперечного сечения и площадками для замера микротвердости. Полученные данные предполагается использовать для оценки состояния материала конструкций (механических свойств), эксплуатируемых в открытом космосе под длительным комплексным влиянием факторов космического пространства.

Ключевые слова: микротвердость, напряжение, деформация, испытание на растяжение, факторы космического пространства

ASSESSING THE STRESS-STRAIN STATE OF SAMPLE MATERIALS THROUGH MICROHARDNESS TESTING

Razhivin V.A., assistant, **Fadeenkov I.P.**, PhD student, **Kovaleva D.A.**, student,
Glushchenkov V.A., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev,
Samara, Russian Federation
E-mail: imp@ssau.ru*

To evaluate the stress-strain state of the specimen material, tensile and microhardness testing methods were used, allowing us to establish a relationship between the stress-strain state of the material and Vickers microhardness. For this purpose, calibration graphs of $HV = f(\sigma, \epsilon)$ were constructed for specimens made of aluminum, titanium alloys, and stainless steel. The tensile and microhardness testing method involves the use of two types of specimens: one according to GOST 1497-84, and the other a stepped specimen with different cross-sectional areas and microhardness measurement sites. The obtained data are intended to be used to evaluate the condition of the material (mechanical properties) of structures operated in outer space under the long-term complex influence of space factors.

Keywords: microhardness, stress, strain, tensile testing, space factors

При выборе материала для космической техники длительного применения необходимо знать, как меняется состояние материала при длительном комплексном воздействии факторов космического пространства. С этой целью предложено испытывать образцы на твердость непосредственно в космосе с помощью инновационного прибора твердости с силоприводом из материала с памятью формы [1, 2]. Полученные с помощью заранее построенных тарировочных графиков $HV = f(\sigma, \epsilon)$ результаты позволят оценить изменение напряженно-деформированного состояния материала (рис. 1). Причем измерение твердости можно осуществлять многократно через длительные промежутки времени.

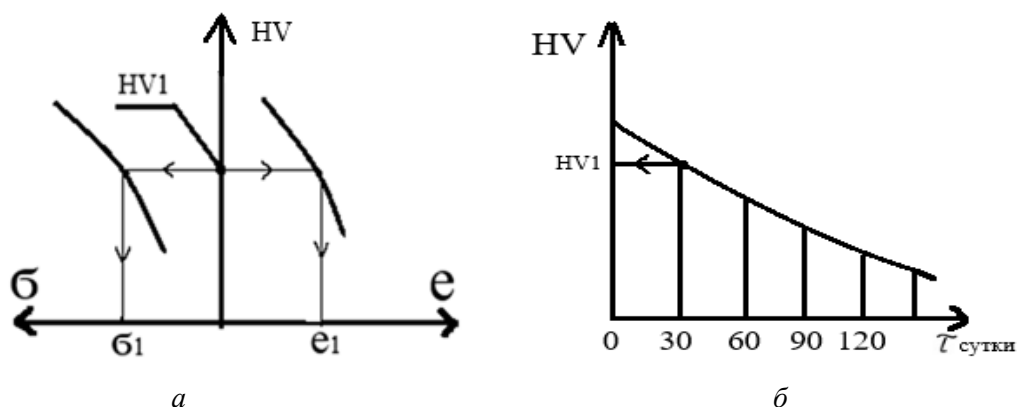


Рис. 1. Тарировочный график связи чисел твердости HV с напряженно-деформированным состоянием материала (а), изменение твердости во времени τ (б)

Для построения тарировочных графиков использовались образцы двух типов: обычного (по ГОСТ 1497-84) [2] и ступенчатого с несколькими диаметрами поперечного сечения и площадками для измерения твердости (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид ступенчатого образца

Такая конструкция позволяет за одно испытание получить сразу несколько точек для построения тарировочного графика при идентичных условиях испытания. При испытании на растяжение на площадке каждого сечения замерялись удлинение и диаметр, рассчитывались напряжение (σ) и деформация (e). На соответствующей площадке определялась микротвердость HV. Контрольные испытания образцов по ГОСТУ позволили подтвердить надежность полученных зависимостей и расширить пределы испытаний, границы построения тарировочных графиков. Испытания на растяжение проводились на испытательной машине TIRAtest 28300 (Германия) с записью соответствующих диаграмм, а измерения твердости – на микротвердомере Matsuzawa MMT-X (Япония) (рис. 3).

В таблице для примера приведены результаты испытаний по двум сечениям ступенчатого образца из сплава В95 и сплава 1420.

Взаимосвязь микротвердости с напряженно-деформированного состояния материала испытываемого образца из сплавов В95 и 1420

Материал образца	№ сечения	σ , н/мм ²	e	HV, н/мм ²
Сплав В95	1	2012,99	0,037	213,3
	2	2767,86	0,07	219,8
Сплав 1420	1	1948,05	0,04	258,4
	2	2631,58	0,0098	294,8

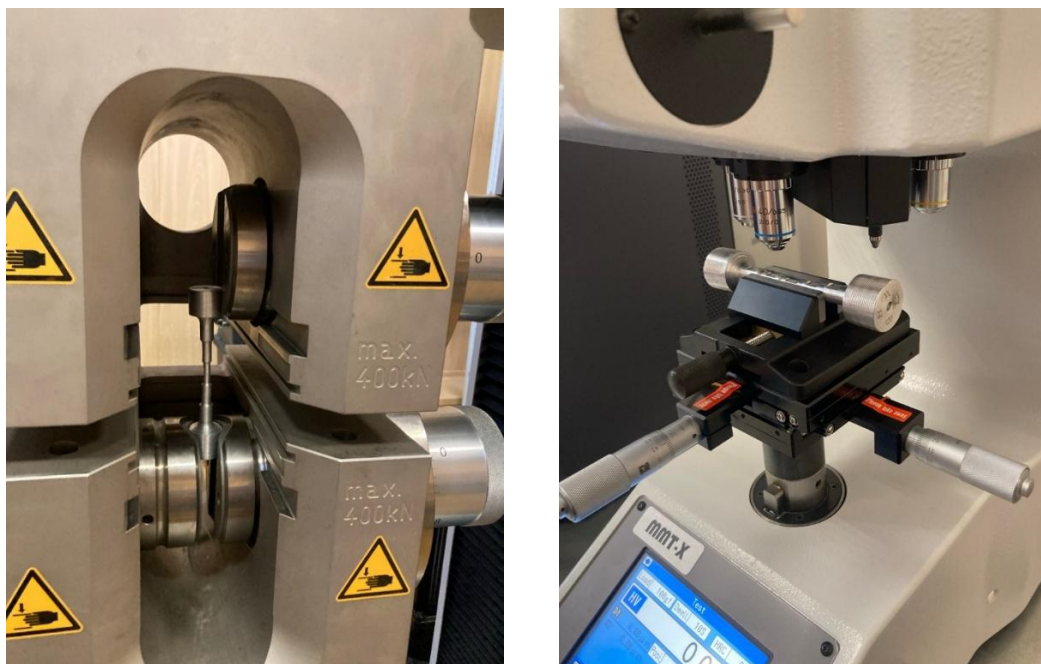


Рис. 3. Испытание ступенчатых образцов на растяжение и на микротвердость

Таким образом, полученные тарировочные графики $HV = f(\sigma, e)$ позволят реализовать программу космического материаловедения на создаваемой российской космической станции (РОС).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. № 2840072 Российская Федерация. Устройство для измерения твердости в условиях космического пространства / Глушников В.А., Фадеев П.В., Показеев В.П., Абрашина С.Х. – 2023. – 5 с.
2. Гречников, Ф.В. Расчет и последовательность проектирования силоприводов из материала с памятью формы для деформирующих и испытательных устройств / Ф.В. Гречников, В.А. Глушников // Известия Самарского научного центра РАН. – 2024. – 117 с.
3. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 32 с.
4. ГОСТ ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Определение твердости по Викерсу. Часть 1. Метод испытания. – Москва: Стандартиформ, 2008. – 25 с.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СЛИТКА ИЗ СПЛАВА СИЛ-1С ЛИТЬЕМ ПОГРУЖЕНИЕМ

Тимошкин И.Ю. , доцент, к.т.н., доцент, **Торпищева О.Н.**, студент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: ivan-mns@mail.ru

Рассматривается получение слитков из сплава СИЛ-1С способом литья погружением. Представлены результаты сравнительного анализа слитков, полученных наполнительным литьем в кокиль и литьем погружением. Установлено, что слитки, полученные литьем погружением, имеют мелкую структуру. При литье слитков погружением выход годного литья составил 95 %.

Ключевые слова: припой СИЛ-1С, слиток, литье погружением, микроструктура, выход годного

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF SIL-1C ALLOY INGOTS BY THE IMMERSION METHOD

Timoshkin I.Yu. , Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Torpischeva O.N.**, student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: ivan-mns@mail.ru

The article discusses the production of ingots from the SIL-1C alloy by immersion casting. The results of a comparative analysis of ingots obtained by coquille filling casting and immersion casting are presented. It has been established that ingots obtained by immersion casting have a fine structure. When casting ingots by immersion, the yield of suitable casting was 95 %.

Keywords: SIL-1C solder, ingot, immersion casting, microstructure, yield

В современном промышленном производстве припой играют ключевую роль, обеспечивая надежные и долговечные соединения различных материалов. В зависимости от состава и области применения припой подразделяются на мягкие (низкотемпературные) и твердые (высокотемпературные). Алюминиевые припои, в частности сплав СИЛ-1С [1], используются преимущественно для соединения алюминия и его сплавов, включая изделия сложной формы и тонкостенные конструкции. Высокая текучесть припоя, способность к заполнению узких зазоров и стойкость к коррозии обеспечивают получение плотных и герметичных швов.

Для пайки конструкций из алюминиевых сплавов припоем СИЛ-1С используются ленты припоя толщиной от 0,3 мм до 2,0 мм. Изготовление таких лент осуществляют прокаткой предварительно отлитого слитка прямоугольного сечения, полученного по традиционной технологии литьем в водоохлаждаемый кристаллизатор. Недостатком данного способа является получение слитка больших размеров (толщина 300–600 мм) и массы, что требует значительных ресурсозатрат для получения припойной ленты заданной толщины.

В рамках ресурсосбережения и малотоннажного производства ленточного припоя для получения малогабаритных слитков, используемых для дальнейшей прокатки, могут применяться металлические формы (кокиль) [2]. Получение слитка в такой форме осуществляется наполнительным литьем непосредственно заливкой расплава в рабочую полость формы (гравитационная заливка) или погружением металлической формы в расплав (литье погружением). На кафедре «ЛиВТ» СамГТУ разработана металлическая форма для получения плоских слитков из сплава марки СИЛ-1С литьем погружением (рис. 1). Размеры слитка, получаемого литьем погружением, составляют 160×100×6 мм.

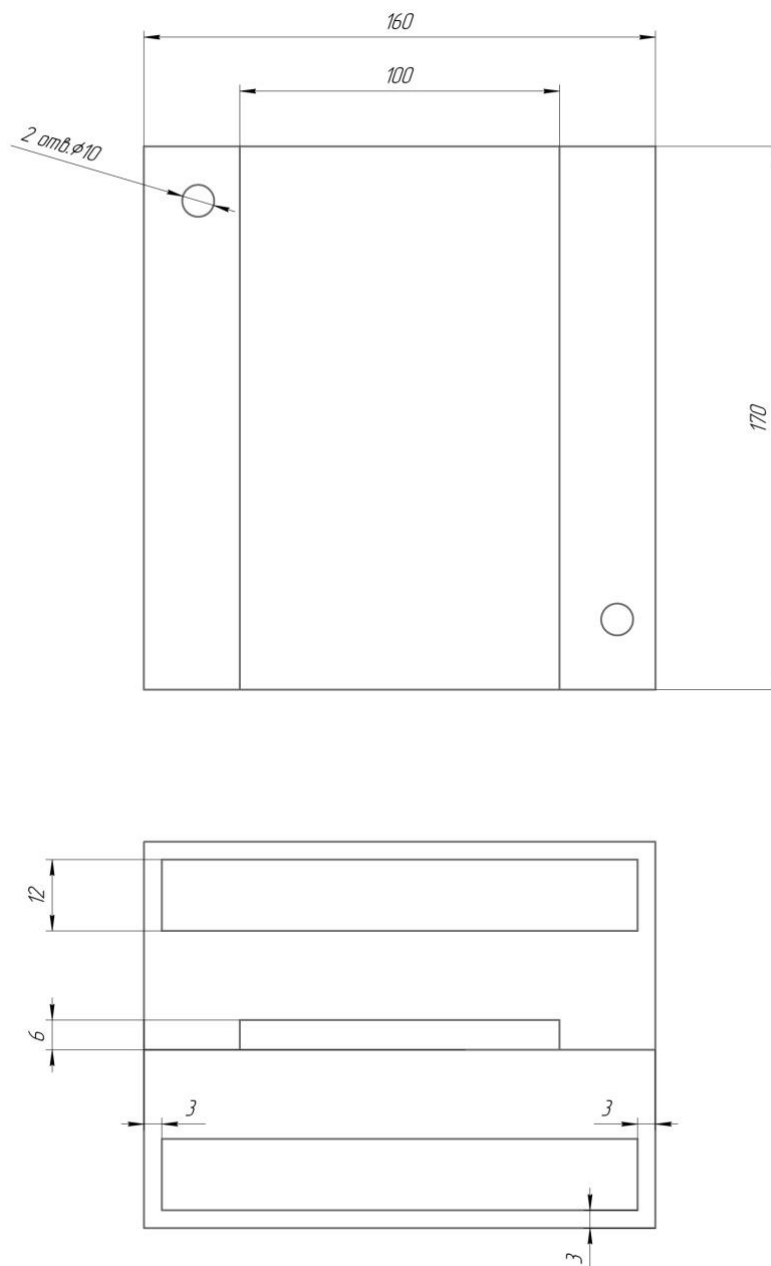


Рис. 1. Форма для литья погружением

Форма для литья погружением состоит из двух полуформ и ручки для опускания формы в расплав. На полуформах предусмотрен кожух, который предназначен для удержания формовочной смеси и предотвращения контакта расплава со стенкой кокиля. Песчаная набивка из формовочной смеси служит дополнительным теплоизоляционным слоем, что позволяет поддерживать рабочую температуру кокиля. На поверхность формы, контактирующей с расплавом, наносится теплозащитное покрытие. Толщина покрытия на внешних поверхностях составляет 0,5 мм. Процесс литья погружением можно представить так: форма вручную погружается в ванну с расплавом на глубину, достаточную для заполнения ее рабочей полости под гидростатическим напором расплава. Выдерживается в неподвижном положении до полного затвердевания всей отливки. Далее форма поднимается из расплава и из нее извлекается отливка [3].

При погружении формы в расплав металл поступает в рабочую полость через нижние короткие питатели. Через эти же питатели происходит питание отливки в период ее затвердевания (рис. 2).

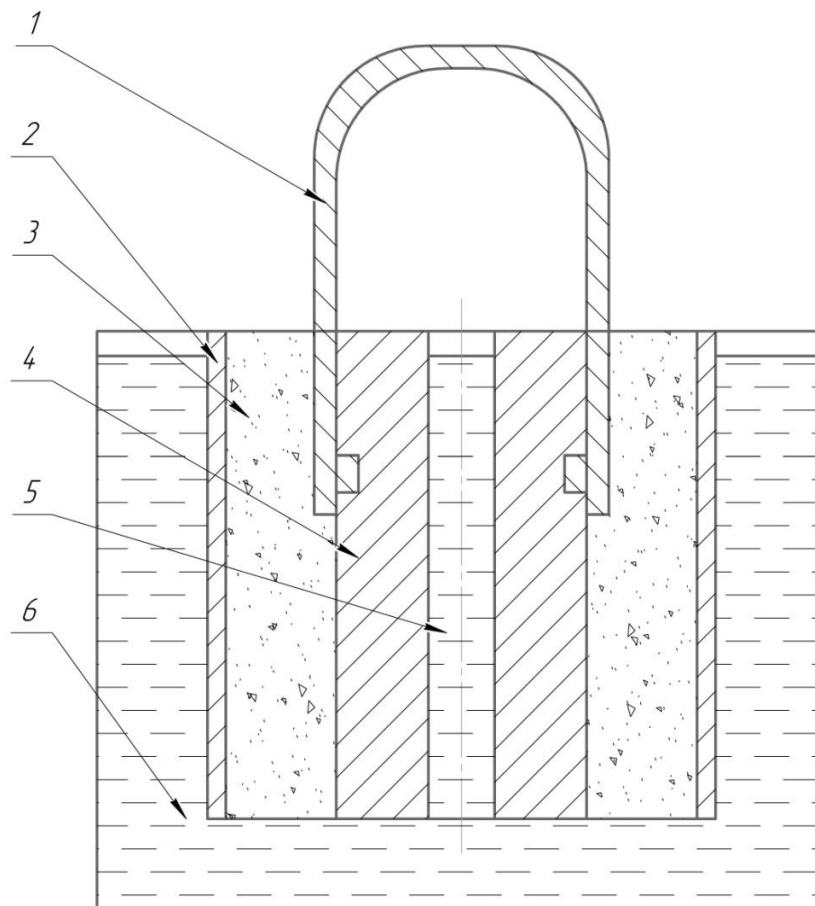


Рис. 2. Получение слитка литьем погружением:
1 – ручка, 2 – кожух, 3 – песчаная набивка, 4 – стенка кокиля,
5 – рабочая полость формы, 6 – ванна расплава

Способ литья погружением в сравнении с традиционным способом литья в кокиль имеет следующие преимущества:

1. Отсутствие громоздких и массивных литниково-питающих систем, которые по своей массе значительно превосходят массу самих отливок.
2. Затраты на изготовление литейных форм значительно ниже, чем для традиционных способов литья.
3. Мелкозернистая структура отливок, повышенные показатели механических свойств и практическое отсутствие газовых дефектов.
4. Высокая производительность и высокий выход годного металла (до 95 %).
5. Возможность изготовления отливок с тонкими стенками.
6. Сокращение брака в отливках.

Целью работы является разработка технологии получения заготовок под прокатку из сплава СИЛ-1С литьем погружением.

Технологический процесс получения слитка литьем погружением представлен на рис. 3.

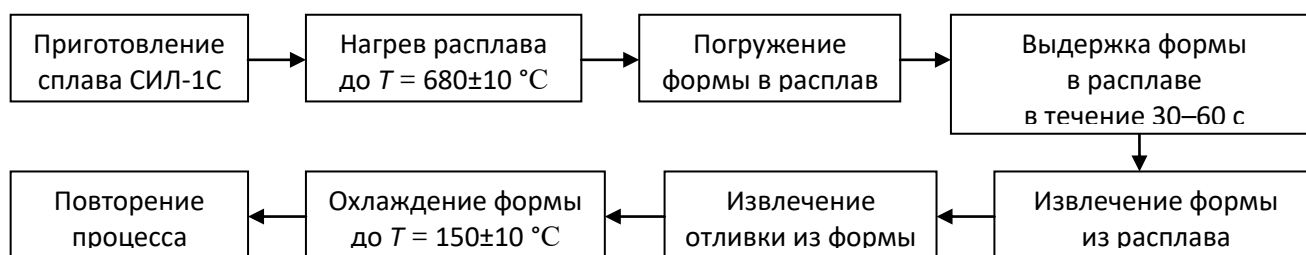


Рис. 3. Технологический процесс получения слитка СИЛ-1С литьем погружением

Основным легирующим элементом припоя СИЛ-1С является кремний, его содержание варьируется в пределах 10–12,5 %. Данный припой относится к эвтектическому сплаву системы Al-Si. В равновесной структуре сплава формируется хрупкая эвтектика $(Al+Si)_{эвт}$, при неравновесных условиях могут формироваться первичные кристаллы кремния ($Si_{п}$), которые резко снижают пластичность. Эти особенности структуры припоя могут оказывать существенное влияние на его технологические свойства и возникновение дефектов при прокатке слитка. На рис. 4 приведены микроструктуры опытных слитков, полученных литьем погружением и наполнительным литьем в кокиль. При наполнительном литье в кокиль получали слиток с габаритами 150×60×16 мм.

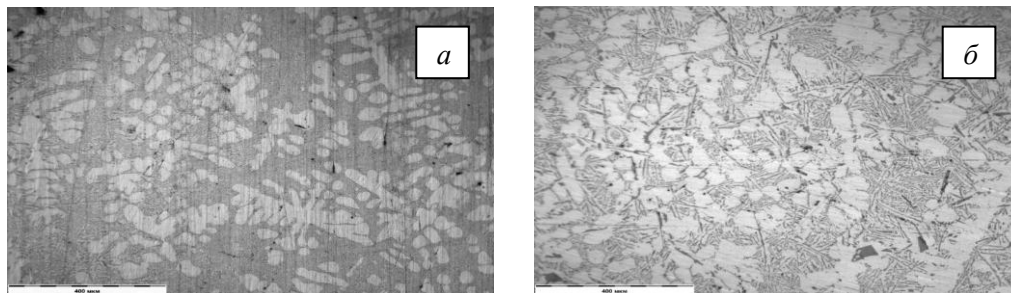


Рис. 4. Микроструктура опытных слитков припоя СИЛ1-С, ×200:
а – литье погружением; б – наполнительное литье в кокиль

Анализ микроструктуры слитков в литом состоянии показал, что в образцах, полученных наполнительным литьем в кокиль, структура крупнозернистая, присутствуют единичные кристаллы первичного кремния ($Si_{п}$) блочной морфологии с размерами 15–20 мкм. Эвтектический кремний имеет крупную игольчатую форму. В образце, полученном литьем погружением, присутствует большее количество дендритов алюминия, эвтектика мелкозернистая, однородная.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что получение слитков литьем погружением является перспективным способом получения малогабаритных заготовок для малотоннажного производства алюминиевого припоя марки СИЛ-1С. Получение слитков литьем погружением позволило повысить выход годного на 20 %, который составил 95 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ОСТ 1-92014-90. Сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.
2. Коврижных, Н.И. Литье погружением / Н.И. Коврижных. – Самара, 2018. – 96 с.
3. Бураков, С.Л. Литье в кокиль / С.Л. Бураков, А.И. Вейник, Н.П. Дубинин. – Москва: Машиностроение, 1980. – 415 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ WC НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T

Устинов П.Н. , аспирант, Родионов И.В., д.т.н., профессор

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Российская Федерация
E-mail: azenrod@gmail.com

Рассмотрен процесс упрочнения поверхностного слоя стали 12X18H10T путем наплавки модифицирующего порошка карбида вольфрама с применением непрерывного лазерного излучения. Выполнены экспериментальные исследования по лазерной наплавке присадочного материала при изменении мощности излучения, скорости сканирования и плотности линий сканирования. По результатам исследования установлено, что наплавка карбида вольфрама приводит к существенному увеличению микротвердости поверхности и образованию механически прочного поверхностного слоя рассматриваемой марки нержавеющей стали.

Ключевые слова: непрерывное лазерное излучение, износ поверхностного слоя, нержавеющая сталь, микротвердость, карбид вольфрама, лазерное модифицирование

STUDY INFLUENCE OF CONTINUOUS LASER SURFACE WC CLADDING ON THE CHARACTERISTICS SURFACE LAYER 12X18H10T STAINLESS STEEL

Ustinov P.N. , PhD student, Rodionov I.V., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation
E-mail: azenrod@gmail.com

This paper examines the process of hardening the surface layer of 12Kh18N10T steel by surfacing with a modifying tungsten carbide powder using continuous laser radiation. Experimental studies were conducted on laser surfacing of filler material with varying radiation power, scanning speed, and scan line density. The study found that surfacing with tungsten carbide significantly increases the surface microhardness and forms a mechanically strong surface layer for this grade of stainless steel.

Keywords: continuous laser radiation, surface layer wear, stainless steel, microhardness, tungsten carbide, laser modification

Применение хромоникелевых сплавов в современных деталях и при производстве различных инструментов является распространенным в развивающихся сферах машиностроения. Нержавеющие стали являются эффективным конструкционным материалом для изготовления изделий, используемых при эксплуатации в агрессивных средах и в условиях высоких термодинамических нагрузок. Нержавеющей стали обладают повышенной коррозионной устойчивостью, высокой формовкостью и пластичностью, благоприятным сочетанием физико-механических свойств и функциональных характеристик. Несмотря на преимущества, у нержавеющей сталей аустенитного класса имеются и недостатки, заключающиеся в недостаточной износоустойчивости и микротвердости поверхностного слоя.

Функционируя в условиях трения или абразивного изнашивания, детали подвергаются интенсивному износу с последующей механической деградацией и эрозией поверхности. Данные эффекты возникают, как правило, при длительной нагрузке на рабочие поверхности детали, где происходит сильное изменение механических характеристик. Для устранения или минимизации износа поверхности нержавеющей сталей целесообразно использовать технологию наплавки мелкодисперсных присадочных порошков при воздействии лазерного излучения [1–4].

В проводимом лабораторном исследовании применялся порошок карбида вольфрама (WC) дисперсностью 1 мкм. В качестве технологического оборудования для наплавки применялась установка лазерного непрерывного излучения с активным элементом CO₂. В качестве связующего компонента для предварительного закрепления порошка на поверхности использовалась графитовая паста. Полученный присадочный материал в виде обмазки наносился на модифицируемую поверхность образцов с последующим лазерным сканированием.

В качестве образца применялась пластина из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т размером 20×70 мм. Пластина проходила подготовительные операции в виде шлифования абразивом различной зернистости и очистки в ультразвуковой ванне «Кристал-2,5» в течение 30 мин.

Для создания обмазки применялась графитовая паста, смешанная с мелкодисперсным порошком карбида вольфрама в соотношении 1:4. Полученная обмазка наносилась на образец, закрепленный в специальной оснастке, борты которой превышали высоту образца примерно на 150–200 мкм. Таким образом, высота слоя обмазки, нанесенной специальным шпателем, на поверхности образца составляла примерно 100–200 мкм (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальный образец в оснастке

В эксперименте применялась лазерная установка RAYLOGIC V12 6040 с активным элементом генерации энергии в виде стеклянной колбы с содержащимся в ней углекислым газом CO₂. Данная установка работает в непрерывном режиме генерации излучения мощностью до 30 Вт, что позволяет получить равномерное распределение энергии при технологическом воздействии на поверхность образцов (рис. 2).



Рис. 2. Лазерная установка RAYLOGIC V12 6040

В эксперименте изменялись три основных параметра настройки излучения: мощность излучения, скорость сканирования и плотность линий сканирования. Обработка проводилась на участках в виде прямоугольников 12×15, которые обозначались цифрами 1, 2 и 3. При наплавке присадочного порошка задавались технологические режимы, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Режимы обработки поверхности лазерным излучением

Номер квадрата	Скорость обработки, мм/с	Мощность лазерного излучения, Вт	Плотность линии, dpi
1	150	18	4
2	150	12	2
3	200	12	2

После наплавки обмазочного материала проводился сравнительный анализ качества модифицированной поверхности. Измерялась микротвердость наплавленного слоя на микротвердомере «ПМТ-3М» по методу Виккерса путем вдавливания четырехгранного индентора. Поверхность, не подвергнутая обработке, обозначалась как экспериментальный (контрольный) участок под номером «0». Результаты измерения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости поверхности после лазерной наплавки порошка карбида вольфрама

Номер экспериментального участка	Микротвердость, ГПа
0 (контроль)	1,98
1	8,98
2	8,65
3	8,51

По результатам измерения микротвердости выявлено, что наибольшим значением данного показателя обладал экспериментальный участок образца под номером 1, что свидетельствует о повышенной механической прочности такой поверхности в сравнении с другими наплавленными участками.

Для исследования глубины проплавления карбида вольфрама на поверхности образцов, были изготовлены поперечные микрошлифы. Образцы в виде металлической пластины были расположены в оснастке под углом 45° и залиты эпоксидной смолой, которая полимеризовалась в течение 24 часов (рис. 3).



Рис. 3. Шлиф образца из хромоникелевой стали 12Х18Н10Т с наплавленными участками WC

После полного затвердевания эпоксидной смолы проводилось шлифование и травление химическим реактивом по стандартной методике подготовки микрошлифов для металлографического анализа. Для проявления объемной структуры и определения глубины упрочненного слоя микрошлиф образца подвергался травлению азотной кислотой. Кислота наносилась равномерным слоем на срез поверхности с выдержкой в течение 10 минут.

После травления слой, который подвергся воздействию лазерного излучения, изменял свой цвет, создавая контрастную структуру относительно цвета основного сплава (рис. 4).

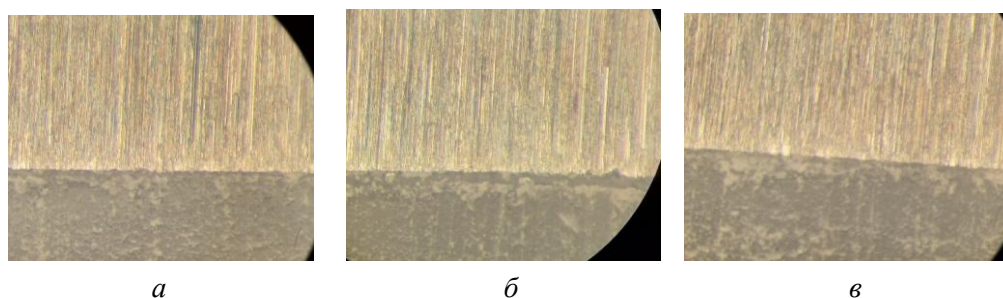


Рис. 4. Микрошлифы различных участков после лазерной наплавки (×56):
а – экспериментальный участок № 1, б – экспериментальный участок № 2,
в – экспериментальный участок № 3

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что после лазерной порошковой наплавки образцов из хромоникелевого сплава 12Х18Н10Т образуется тонкий упрочняющий слой толщиной порядка до 50–55 мкм с высокой микротвердостью – 8,51–8,98 ГПа. Экспериментальными исследованиями установлено, что в процессе лазерной наплавки мелкодисперсного присадочного порошка карбида вольфрама на поверхность хромоникелевого сплава 12Х18Н10Т формируется тонкий модифицирующий слой толщиной 50–55 мкм. Микротвердость экспериментальных участков поверхности, на которые проведена наплавка порошка WC при различных режимах, достигала 8,51–8,98 ГПа при микротвердости поверхности контрольного участка 1,98 ГПа. При осуществлении непрерывного лазерного излучения удалось добиться равномерности проплавления частиц порошковой присадки по всей толщине нанесенного обмазочного слоя. Микротекстура наплавленной поверхности характеризовалась высокой однородностью без наличия выраженных дефектов и структурных несплошностей.

Заданные технологические режимы позволили получить тонкослойные покрытия, которые можно использовать для изготовления деталей и узлов трения, режущих инструментов, рабочих элементов дробильного оборудования, ножей гильотин, шнековых конструкций для сыпучих материалов и разделения суспензий, лопастей насосов высокого давления, инструментов породоразрушающего действия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Невзоров, М.В. Функционализация металлических порошков для лазерной наплавки / М.В. Невзоров // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Гомель, 24–25 апреля 2025 г. – Гомель: Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, 2025. – С. 34–36.
2. Чжан Цин. Разработка и исследование процесса наплавки присадочного порошка импульсно-периодическим лазерным излучением: специальность 05.03.01: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Чжан Цин. – Москва, 2008. – 16 с.
3. Панов, В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них: учебное пособие для вузов / В.С. Панов, А.М. Чувилин. – Москва: МИСИС, 2001. – 432 с.
4. Горленко, А.О. Технология создания износостойких поверхностных слоев с имплантированными материалами на основе карбида вольфрама: справочник / А.О. Горленко, С.В. Давыдов // Инженерный журнал. – 2017. – № 1 (238). – С. 3–10.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СКЛАДНОЙ ХВОСТОВОЙ БАЛКИ БПЛА ТИПА АВТОЖИР

Учуватова Д.А.^{1✉} обучающийся, Маричева Е.А.^{1,2}, обучающийся,
Яблонский А.Н.¹, обучающийся, Левшонков Н.В.¹, к.т.н., доцент

¹ КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань, Российская Федерация

² ООО «Робософт», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: ucuvatovadara@gmail.com

Разработаны технологический процесс и оснастка для изготовления деталей хвостовой балки автожира, обеспечены равномерная пропитка связующего, низкая пористость, обоснован выбор метода формования HP-RTM, проведены нагружения балки из D16T и UMT49-12K, определены режимы формования.

Ключевые слова: автожир, хвостовая балка, складываемость, HP-RTM, радиальное плетение, композиты

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF A FOLDING TAIL BOOM OF AN AUTOGYRO TYPE UAV

Uchvatova D.A.^{1✉}, student, Maricheva E.A.^{1,2}, student, Yablonsky A.N.¹, student,
Levshonkov N.V.¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ KNRTU-KAI named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation

² ООО "Robosoft", Kazan, Russian Federation

E-mail: ucuvatovadara@gmail.com

The technological process and equipment for the manufacture of parts of the tail boom of the gyroplane have been developed, uniform impregnation of the binder, low porosity has been ensured, the choice of the HP-RTM molding method has been justified, D16T and UMT49-12K beams have been loaded, and molding modes have been determined.

Keywords: gyroplane, tail boom, folding, HP-RTM, radial weaving, composite material

Известно множество изобретений, относящихся к беспилотным летательным аппаратам и выполняющих множество различных задач, включая грузоперевозки, наблюдение, патрулирование и т. д. Среди них выделим аппарат типа «автожир» [1]. Так, Шемяковым В.А. и др. была рассмотрена задача доставки ограниченных партий грузов малочисленным подразделением, выполняющим задачи в труднодоступной местности [2]. Концепция автожира определяет его перспективность как аппарата для транспортировки средних грузов на средние расстояния.

Одним из элементов конструкции автожира с толкающим винтом является хвостовая балка. Для уменьшения габаритов при транспортировке и хранении автожира можно применить складной механизм хвостовой балки. Это позволит повысить мобильность и адаптивность к условиям эксплуатации. Однако механизм складывания предъявляет повышенные требования к точности и прочности изготовления.

Для выполнения повышенных требований необходимо разработать и оптимизировать под возможности производства технологический процесс и оборудование для изготовления деталей хвостовой балки. Настоящая статья посвящена разработке технологического процесса и оснастки для изготовления детали хвостовой балки автожира с учетом конструктивных особенностей складной схемы и современных требований авиационного производства.

Научная новизна данной работы заключается в обосновании и разработке технологического процесса изготовления детали хвостовой балки автожира со складной схемой с применением композиционных материалов.

Хвостовая балка автожира (рис. 1) – это элемент летательного аппарата, который воспринимает статические и динамические нагрузки во время горизонтальной фазы полета и эволюций автожира в воздухе.

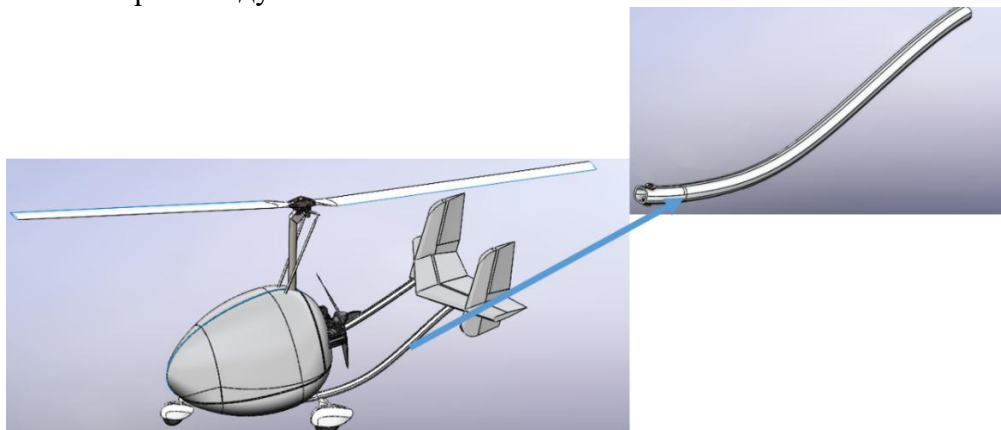


Рис. 1. Автожир и хвостовая балка

В современной производственной практике выбор материала является первым этапом после расчета требований к детали. Проведенные прочностные расчеты (рис. 2) показали, что при равных эксплуатационных нагрузках конструкции из композиционных материалов обладают существенно меньшей массой и более равномерным распределением напряжений по длине балки, чем та же балка, но изготовленная из алюминиевого сплава. К тому же возможности технологий изготовления деталей из композиционных материалов позволяют дополнительно усилить элемент под известные нагрузки без увеличения массы. Таким образом, композиционные материалы являются наиболее обоснованными для изготовления складной хвостовой балки автожира.

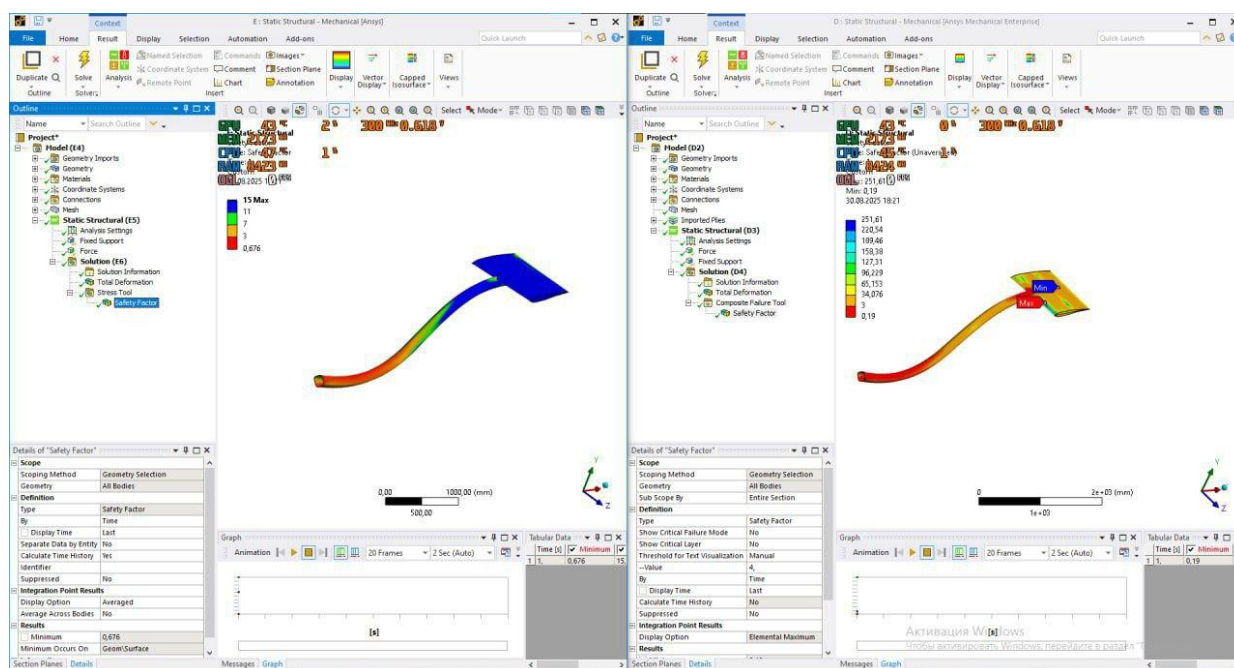


Рис. 2. Сравнение нагрузок хвостовой балки для разных материалов

Формование детали будет осуществлено процессом HP-RTM (High Pressure Resin Transfer Molding). HP-RTM подразумевает пропитку предварительно сформированной сухой волокнистой заготовки связующим под повышенным давлением в закрытой пресс-форме. Данный метод позволяет гарантированно обеспечить низкую пористость и, как следствие, высокие механические характеристики и низкий процент брака, в том числе благодаря возможностям гибкого контроля за процессом.

Важными факторами при производстве детали являются скорость и простота изготовления. Для процесса формования хвостовой балки автожира методом HP-RTM-формования требуется специальная формообразующая оснастка с возможностью протекания связующего, специальная оснастка для HERZOG и установка для HP-RTM-формования. Материалом оснастки был выбран Д16Т, так как он обладает сравнительно невысокой плотностью, низкой химической активностью, высокой теплопроводностью, податливостью штамповке.

Хвостовая балка (рис. 3) изготавливается методом биаксиального радиального плетения на оправку из вспененного полимера ACRIMID 60 A¹, в качестве углеродного волокна используется отечественный угольный ровинг марки UMT49-12K, которая имеет низкий КЛРТ. Связующим компонентом выбрана российская смола Т-26, предназначенная для применения в трансферных методах формования. Компоненты имеют паспорт соответствия авиационным правилам и нормам летной годности. Ориентация волокон имела величину ± 45 градусов относительно продольной оси, также хвостовая балка имеет вставные элементы для крепления механизма поворота. Технология подразумевает применение радиального плетения на установке типа HERZOG.

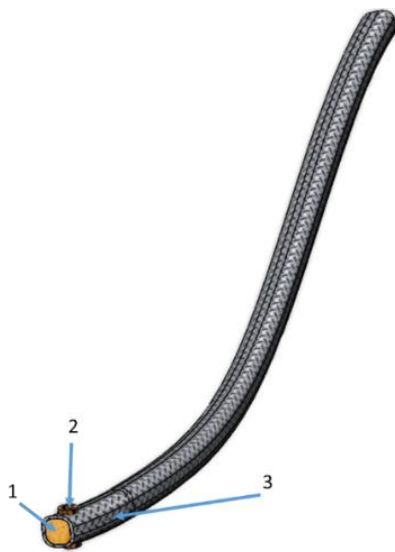


Рис. 3. Хвостовая балка автожира:

1 – пенопластовый сердечник, 2 – вставные элементы для крепления механизма поворота хвостовой балки, 3 – плетеная структура

Далее преформа с сердечником из пенопласта и вставными элементами закладывается в оснастку (рис. 4).

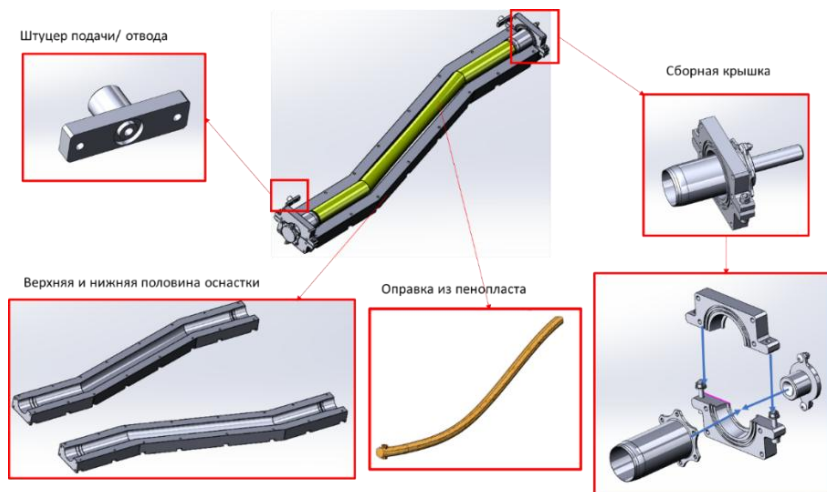


Рис. 4. Сборка оснастки

Третьим этапом готовая преформа устанавливается в оснастку. Оснастка также включает в себя два штуцера на вход и выход связующего. По периметру оснастки устанавливается герметизирующий жгут (рис. 5).



Рис. 5. Схема подачи и откачки связующего

Перед помещением в конвекционную печь половины оснастки соединяются, проводится испытание на герметичность методом создания разрежения. Затем в печи оснастка достигает температуры инъекции и находится при данной температуре до выравнивания температур. Параллельно готовится смола. Для удаления растворенных в ней газов и испаряемых компонентов связующее выдерживается при температуре инъекции. Эта процедура важна для обеспечения качества и долговечности конечного изделия.

Далее к оснастке подключаются шланги для подачи связующего и оно подается в оснастку. Процесс заполнения продолжается до окончания выхода из шланга связующего с видимыми пузырьками. Пропитка происходит от входного к выходному шлангу под давлением. Давления и температуры процесса определяются исходя из расчетов. Визуализация ориентировочных температурных режимов представлена на кривой на рис. 6.

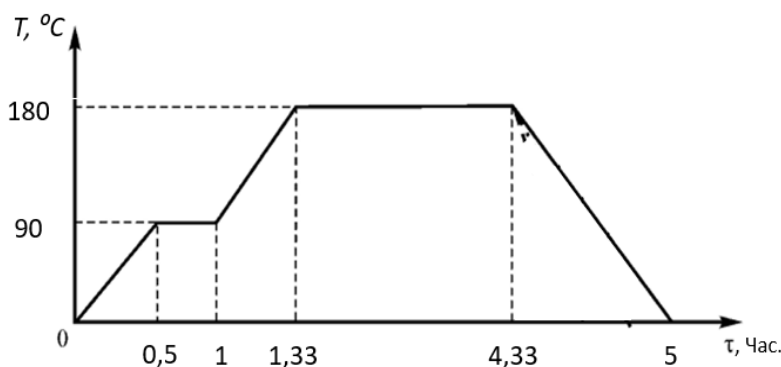


Рис. 6. Температурная кривая, используемая в процессе формования

В интервале времени от 0,5 до 1 часа осуществляется выравнивание температурной разности в детали и испарение летучих компонентов. Далее, в период с 1 до 1,33 часа, температура постепенно повышается до второго заданного уровня, который необходим для начала отверждения полимерной матрицы. На участке 1,33–4,33 часа проходит основной этап отверждения, после чего, с 4,33 до 5 часов, происходит охлаждение изделия. Процесс охлаждения может выполняться совместно с печью, на воздухе в оснастке либо на открытом воздухе после извлечения детали. В ходе разработки процесса производства рассмотрены конструктивные и технологические особенности детали хвостовой балки автожира, предназначенной для работы в складной конструкции, обоснован выбор технологических решений для ее изготовления. Показано, что наличие механизма складывания предъявляет повышенные требования к прочности, жесткости и точности изготовления элементов хвостовой балки, а также к стабильности их эксплуатационных характеристик.

Установлено, что применение технологии радиального плетения для формирования волокнистой заготовки позволяет обеспечить качество и непрерывность армирования, рациональную ориентацию волокон в соответствии с характером действующих нагрузок и повышение несущей способности конструкции при минимальной массе. Данный подход особенно эффективен для полых элементов сложной геометрии, характерных для хвостовых балок летательных аппаратов.

Обоснован выбор метода формования HP-RTM, который осуществляет гарантированную равномерную пропитку армирующей заготовки связующим под повышенным давлением и температурой, позволяет достичь низкой пористости, высокой повторяемости и предсказуемости геометрических и механических параметров. Совмещение радиального плетения и технологии HP-RTM позволяет повысить технологичность изготовления детали, сократить трудоемкость производства и обеспечить требуемый уровень надежности узлов складывания хвостовой балки. Таким образом, предложенный технологический процесс и разработанная оснастка могут быть рекомендованы для применения при изготовлении деталей хвостовой балки автожира и соответствуют современным требованиям авиационного производства к легкости, прочности и технологичности композиционных конструкций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. № 204358 Российская Федерация. Летательный аппарат – автожир: № 2020142729: заявл. 23.12.2020: опубл. 25.05.2021, Бюл. № 15 / Краснобородько В.В.
2. Пат. США № US 3097701 A, 16.07.1963. Механизм складывания лопастей (Blade Folding Mechanism) // United States Patent. – 1963. – № 3. – 097,701 / Buivid M.D.
3. Шемяков, В.А. Повышение эффективности доставки ограниченных партий грузов малочисленным подразделением, выполняющим задачи в отрыве от главных сил в труднодоступной местности за счет применения автожиров (гиропланов) / В.А. Шемяков, О.И. Бушмин, С.А. Соловьев // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-Западного федерального округа России. – 2022. – № 1 (55). – С. 92.
4. Гечев, Т. Автожиры: обзор и классификация / Т. Гечев, К. Недельчев, И. Кралов // Аэрокосмическая отрасль. – 2025. – Т. 12, № 1. – С. 48.
5. Войтас, М. Новая технология многослойных структур, реализованная в отдельных компонентах автожиров / М. Войтас, Т. Щепаник, Л. Чайковский // 31-й Конгресс Международного совета по авиационным наукам. – Белу-Оризонти, Бразилия. – 2018. – С. 9–14.
6. Сравнительная оценка жизненного цикла процессов производства автомобильных капотов из CFRP с использованием низкотемпературного RTM, компрессионного RTM и высокотемпературного RTM / А. Вита [и др.] // ProcediaCirr. – 2019. – Т. 80. – С. 352–357.
7. Мониторинг фронта потока при литье под высоким давлением с использованием фазированной ультразвуковой решетки для оптимизации моделирования заполнения формы / Л. Литтнер [и др.] // Материалы. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 207.
8. Попов, Ю.И. Методика весового анализа складного крыла самолёта палубного базирования / Ю.И. Попов, М.В. Ярыгина // Труды МАИ: Электронный журнал. – Вып. № 43. – С. 18–22.

ВЛИЯНИЕ БОРОТИТАНИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 12Mn

Чжан С.¹, аспирант, Гурьев А.М.^{1,2,3}, д.т.н.

¹ Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул, Российская Федерация

² Компания Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd., Шаосин, Китай

³ Ключевая лаборатория цифрового текстильного оборудования провинции Хубэй, Уханьский текстильный университет, Ухань, Китай

E-mail: 1822169026@qq.com

Проведена химико-термическая обработка стали 12Mn с применением обмазки, содержащей B_4C и TiB_2 . Исследовано влияние температуры борирования (850–1000 °C) на структуру, толщину и микротвердость упрочненного слоя. Результаты показали, что толщина упрочненного слоя увеличивается с ростом температуры: с 43 мкм при 850 °C до 125 мкм при 1000 °C. Микротвердость достигает пикового значения 1665 HV при температуре насыщения 950 °C. При 1000 °C из-за укрупнения игл боридов и образования микропор твердость снижается до 1400 HV. Исследование определяет оптимальную температуру процесса, равную 950 °C, что обеспечивает теоретическую основу и технологический ориентир для поверхностного упрочнения низкоуглеродистой низколегированной стали 12Mn для повышения износостойкости к абразивному износу.

Ключевые слова: низкоуглеродистая низколегированная сталь, упрочнение, боротитанирование, микротвердость, износостойкость

THE EFFECT OF BOROTITANIZING ON THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF 12MN STEEL SURFACE

Zhang X.¹, PhD student, Guryev A.M.^{1,2,3}, Grand PhD in Engineering Sciences

¹ Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

² Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd., Shaoxing, China

³ Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, China

E-mail: 1822169026@qq.com

This study employed a paste containing TiB_2 to perform borotitanizing treatment on 12Mn steel, systematically investigating the effects of boriding temperature (850–1000 °C) on the microstructure, thickness, and microhardness of the hardened layer. The results indicate that the thickness of the hardened layer increased significantly with rising temperature, from 43 μm at 850 °C to 125 μm at 1000 °C. The microhardness reached a peak value of 1664.83 HV at 950 °C, corresponding to a dense and uniform coating structure with cooperative growth of Fe_2B and TiB_2 phases. At 1000 °C, the hardness decreased to 1399.75 HV due to the coarsening of boride grains and the formation of micropores. The research reveals the synergistic strengthening mechanism of B–Ti composite boriding and identifies 950 °C as the optimal process temperature. This provides a theoretical basis and process reference for the low-cost surface strengthening of 12Mn steel under high-wear working conditions, such as in mining machinery.

Keywords: 12Mn steel, borotitanizing, microhardness, coating microstructure

Технологии обработки поверхности являются одним из ключевых способов улучшения эксплуатационных свойств инженерных материалов. В частности, химико-термическая обработка благодаря отработанной технологии, высокой эффективности упрочнения, а также значительному улучшению износостойкости и коррозионной стойкости материалов широко применяется для улучшения характеристик штамповых, конструкционных сталей и других материалов [1, 2, 3]. Традиционное одноэлементное борирование позволяет формировать на по-

верхности стали высокотвердый боридный слой, состоящий в основном из FeB и Fe₂B, что значительно повышает микротвердость поверхности – до 1400–1900 HV. Однако у данной технологии есть ряд ограничений: высокая хрупкость боридного слоя, склонность к образованию микротрещин; отсутствие плавного градиента твердости между слоем и основой; сложность совместной оптимизации износостойкости и ударной вязкости в сложных условиях эксплуатации, сочетающих высокий износ и ударные нагрузки. Для улучшения структуры и комплексных свойств боридного слоя в последние годы исследователи пытаются добавлять в борирующую среду модифицирующие элементы, что позволяет контролировать процесс роста боридного слоя и получать более плотные, однородные и пластичные покрытия [4, 5]. Среди множества модифицирующих элементов титан (Ti) привлекает особое внимание благодаря своей способности образовывать стабильную фазу TiB₂, подавлять укрупнение игл Fe₂B и образование большого количества фазы FeB, улучшать сплошность слоя. По сравнению с традиционным одноэлементным борированием введение титана способствует регулированию морфологии боридов, повышает износостойкость и улучшает прочность сцепления на границе раздела фаз [6].

Борирование из насыщающих обмазок обладает высокой практической ценностью благодаря гибкости процесса, применимости к деталям сложной формы и низким требованиям к оборудованию. Паста обычно состоит из нескольких компонентов: источника бора, источника дополнительных атомов (в нашем случае титана), инертного наполнителя, активатора и связующего, соотношение которых определяет кинетику реакций образования активированных атомов и борирования в целом. Поэтому выяснение закономерностей кинетики процесса борирования и эволюции структуры боридного слоя для конкретного состава обмазки при разных температурах борирования имеет большое значение для оптимизации технологии. Исходя из этого в данной работе в качестве объекта исследования выбрана сталь GB 12Mn. С использованием разработанной обмазки, содержащей TiB₂, проведен эксперимент по боротитанированию. Изучено влияние температуры борирования на толщину слоя, морфологию микроструктуры и микротвердость с целью исследования влияния температурно-временных параметров борирования на кинетику образования, эволюцию боридного слоя и предоставления технологического обоснования для недорогого высокоэффективного поверхностного упрочнения стали GB 12Mn в условиях высокого износа, например, в горнодобывающей технике и для обработки почвы.

В качестве основного материала в исследовании применялась сталь 12Mn по китайскому национальному стандарту GB 1591 1988. Химический состав использованной в эксперименте плавки стали исследовали при помощи оптико-эмиссионного анализатора химического состава металлов G.N.R. SolarisCCDPlus: (в масс. %): C – 0,14; Si – 0,345; Mn – 1,42; Fe – остальное. Данная плавка стали является аналогом стали 09Г2С по ГОСТ 19281–2014. Образцы были изготовлены в виде прямоугольных блоков размером 8×10×20 мм³. Перед борированием поверхность образцов последовательно шлифовалась наждачной бумагой зернистостью 180 и 600 для удаления окалины и поверхностных загрязнений, затем промывалась в безводном этаноле и высушивалась при комнатной температуре. Борирование проводилось из обмазки, состав которой и температуры насыщения представлены в табл. 1. Сначала указанные порошковые компоненты были точно взвешены и тщательно перемешаны в ступке до обеспечения однородности. Затем к смеси добавлялась деионизированная вода при постоянном перемешивании до образования однородной пастообразной массы.

Таблица 1

Состав пасты и параметры эксперимента

Режим	Температура, °C	Состав смеси (масс. %)
B1	850	69 % B ₄ C+4 % TiB ₂ +8 % SiC+4 % KBF ₄ +9 % Al ₂ O ₃ +5 % бентонита
B2	900	
B3	950	
B4	1000	

Данная паста равномерно наносилась на все поверхности образца, толщина покрытия контролировалась в диапазоне 4 ± 1 мм. После нанесения образцы высушивались при температуре 25 ± 2 °C в течение 24 часов до формирования плотной сухой пленки.

Высушенные образцы помещались в камерную печь сопротивления типа SX2-4-17TP, нагревались со скоростью 8 °C/мин до заданной температуры и выдерживались при этой температуре в течение 2 часов. После выдержки образцы охлаждались вместе с печью до комнатной температуры. После борирования образцы выдерживались в воде при 60 °C в течение 2 часов для размягчения и удаления остатков обмазки с поверхности. Затем осуществлялись вырезка металлографических темплетов, их запрессовка в бакелитовый компаунд, шлифовка, полировка и травление 4 %-ным раствором азотной кислоты в этаноле. Микроструктура поперечного сечения образцов наблюдалась с помощью оптического микроскопа Olympus DSX-HRUF, а микротвердость покрытия измерялась при нагрузке 1000 г (9,8 Н). На рисунке представлена микроструктура поперечного сечения образцов и упрочненных слоев, полученных на стали 12Мн при разных температурах борирования. В табл. 2 обобщены данные о толщине слоя и микротвердости в соответствующих условиях.

Таблица 2

Толщина и твердость покрытия при разных температурах

Температура, °C	850	900	950	1000
Толщина, мкм	43	69	115	125
Твердость, HV	799	928	1665	1400

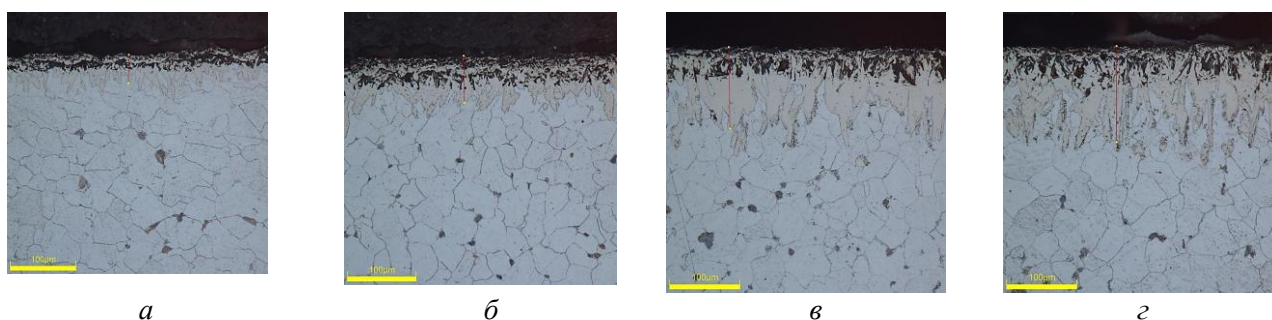


Рис. 1. Микроструктура образцов:
а – В1 (850 °C), б – В2 (900 °C), в – В3 (950 °C), з – В4 (1000 °C)

Результаты эксперимента показывают, что толщина упрочненного слоя увеличивается с повышением температуры борирования, что соответствует типичной кинетике, контролируемой диффузией. При 850 °C слой тонкий (43 мкм), а его твердость относительно низкая и соответствует твердости закаленной среднеуглеродистой стали – 799 HV, что указывает на начальную стадию реакции борирования с недостаточной движущей силой диффузии. При повышении температуры до 900 °C толщина слоя увеличивается до 69 мкм, а твердость возрастает до 928 HV, что свидетельствует об ускорении диффузии и начале эффективного формирования слоя. При 950 °C слой достигает оптимальных показателей: толщина 115 мкм, микротвердость 1665 HV. При этой температуре наблюдается синергетическое взаимодействие элементов В и Ti, способствующее совместному формированию в слое фаз Fe₂B, (Fe,Ti)B₂ и созданию плотного, сплошного и высокотвердого комплексного боридного слоя. Введение TiB₂ не только измельчает зерна Fe₂B, но и эффективно подавляет образование хрупкой фазы FeB, что значительно повышает показатели механических свойств и структурную стабильность слоя.

Однако при дальнейшем повышении температуры борирования до 1000 °C, несмотря на увеличение толщины слоя до 125 мкм, микротвердость снижается до 1400 HV. Микроанализ показывает, что чрезмерно высокая температура приводит к значительному укрупнению зерен боридов, появлению микропор внутри слоя и снижению его плотности. Кроме того, распределение высокотвердых фаз по толщине становится менее однородным, вклад поверх-

ностной области в твердость уменьшается, что отражает негативное влияние высокой температуры на однородность структуры слоя и эффект упрочнения. Таким образом, в условиях данного эксперимента оптимальной температурой для пастового борирования с модификацией титаном является 950 °С, что позволяет получить максимальную твердость и наилучшую морфологию структуры при обеспечении достаточной толщины слоя.

В работе применен процесс борирования из борсодержащей обмазки с модификатором TiB_2 для комплексной В-Тi-обработки стали 12Мн. Изучено влияние температуры борирования (850–1000 °С) на морфологию структуры, толщину и микротвердость упрочненного слоя. Получены следующие основные выводы: толщина упрочненного слоя значительно увеличивается с повышением температуры борирования – с 43 мкм при 850 °С до 125 мкм при 1000 °С, что подтверждает диффузионно-контролируемый характер процесса. Микротвердость с повышением температуры сначала возрастает, а затем снижается, достигая пикового значения 1665 HV при 950 °С, что соответствует плотной и однородной структуре слоя. Снижение твердости при 1000 °С обусловлено укрупнением игл боридов и образованием микропор.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Compound Boronizing and its Kinetics Analysis for H13 Steel with Rare Earth CeO_2 and Cr_2O_3 / S. Mei, Y. Zhang, Q. Zheng [et al.] // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – No. 7. – Art. 3636. – DOI: 10.3390/app12073636.
2. Characterization of the microstructure and self-lubrication properties of a $AlCoCrFeNi_{21}$ eutectic high-entropy alloy with powder-pack boronizing / Y. Zhang, H. Wu, Y. Chen [et al.] // *Materials Characterization*. – 2022. – Vol. 191. – Art. 112118. – DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112118.
3. Microstructure and tribological performance of boride layers on ductile cast iron under dry sliding conditions / D. Zhang, X. Li, X. Du [et al.] // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – Vol. 134. – Art. 106080. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106080.
4. Enhancement of tribo-corrosion performance of carbon steel through boronizing and BN-based coatings / J.N. Panda, B.C. Wong, E. Medvedovski, P. Egberts // *Tribology International*. – 2021. – Vol. 153. – Art. 106666. – DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106666.
5. Tribological, oxidation and corrosion properties of ceramic coating on AISI H13 steel by rare earth-Cr composite boronizing / Q. Zheng, S. Mei, Z. Xiao [et al.] // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50. – No. 6. – Pp. 8760–8776. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.12.193.
6. Effect of borotitanizing on microstructure and wear behavior of Inconel 625 / A. Günen, E. Kanca, H. Çakir [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 311. – Pp. 374–382. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.12.097.

СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЯ ПОРОШКОВ $MgAl_2O_4$ В КАЧЕСТВЕ АНТИКОРРОЗИОННОГО АГЕНТА

Чэнь Сяпин, магистрант, Илела А.Э. , к.т.н., доцент

Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация
E-mail: 10detahy@tpu.ru

Порошок магнезиево-алюминиевой шпинели ($MgAl_2O_4$) был синтезирован тремя различными методами с целью сравнительной оценки их характеристик. Установлено, что использование метода распылительной сушки позволяет получить материал с наибольшей удельной площадью поверхности ($120,92 \text{ м}^2/\text{г}$) и меньшим средним размером частиц ($\sim 0,37 \text{ мкм}$) в ряду НРС – СВЧ ($\sim 0,59 \text{ мкм}$) – Ф ($\sim 0,60 \text{ мкм}$). Результаты исследований показывают, что порошок $MgAl_2O_4$, полученный методом нанораспылительной сушки, обладает значительным потенциалом для применения в качестве функциональной добавки к антикоррозионным покрытиям.

Ключевые слова: магнезиево-алюминиевая шпинель, нанораспылительная сушка, удельная поверхность, лазерная дифракция, антикоррозионные покрытия

SYNTHESIS AND APPLICATION OF $MgAl_2O_4$ POWDERS AS AN ANTICORROSIVE AGENT

Chen Xiaping, Master's Degree student, Ilela A.E., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
E-mail: 10detahy@tpu.ru

In this work, magnesium-aluminum spinel ($MgAl_2O_4$) powder was synthesized by three different methods for a comparative evaluation of their characteristics. It was found that the use of the spray-drying method yields a material with the highest specific surface area ($120.92 \text{ m}^2/\text{g}$) and the smallest average particle size ($\sim 0.37 \text{ }\mu\text{m}$) in the series of methods: Nano Spray Drying (NSD) – Microwave-assisted synthesis ($\sim 0.59 \text{ }\mu\text{m}$) – Filtration method ($\sim 0.60 \text{ }\mu\text{m}$). The research results indicate that the $MgAl_2O_4$ powder obtained by the nano spray-drying method holds significant potential for application as a functional additive in anti-corrosion coatings.

Keywords: magnesium-aluminum spinel, nano spray drying method, specific surface area, laser diffraction, anti-corrosion coatings

Коррозия металлов наносит значительный экономический ущерб, снижает надежность конструкций и создает риски для окружающей среды [1, 2]. Одним из ключевых методов защиты является использование ингибиторов коррозии или нанесение антикоррозионных покрытий. Существует множество неорганических ингибиторов, таких как фосфаты, хроматы и т. д., однако использование этих соединений может оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду [3, 4]. Поэтому современные исследования сосредоточены на поиске высокоэффективных нетоксичных составов.

Наночастицы (НЧ) оксидов металлов, применяемые в качестве ингибиторов коррозии и добавок к покрытиям, привлекают пристальное внимание исследователей [5, 6]. Среди неорганических оксидов популярной и перспективной добавкой является алюмомагнезиевая шпинель ($MgAl_2O_4$) благодаря сочетанию высокой химической стабильности, экологичности и способности эффективно повышать барьерные свойства защитных систем [7, 8].

Критически важным для реализации потенциала НЧ является метод синтеза порошка, который определяет такие ключевые характеристики, как дисперсность, удельная поверхность и морфология частиц, напрямую влияющие на свойства состава. В настоящее время для синтеза ультрадисперсных порошков шпинели применяются различные подходы:

золь-гель процессы, соосаждение, микроволновый синтез, метод фильтрационного осаждения и распылительная сушка. Таким образом, целями данной работы являются сравнительное исследование характеристик порошков MgAl_2O_4 , синтезированных тремя различными методами (нанораспылительная сушка (НРС), микроволновый синтез (СВЧ), фильтрационный метод (Ф)), и оценка их потенциала в качестве функциональной добавки для антикоррозионных покрытий.

Материалы и методы

Для синтеза НЧ MgAl_2O_4 были приготовлены 0,5 М растворы солей алюминия и магния в пропорциях $[\text{Al}^{3+}]:[\text{Mg}^{2+}] = 80:20$. Были использованы $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Все растворы готовили с использованием дистиллированной воды. Суспензию получали методом обратного осаждения путем добавления соли к раствору осадителя – аммиака (NH_4OH). Методом фильтрации твердую фазу отделяли от жидкой с помощью фильтровальной бумаги. Затем помещали осадок на чашку Петри и в сушильный шкаф, предварительно нагретый до 70 °С. При использовании СВЧ-метода приготовленные суспензии пропускали через фильтрующее устройство для разделения твердой и жидкой фаз. Твердый осадок, полученный фильтрацией, помещали в микроволновую печь для высокотемпературной термообработки при 300–500 °С. В опытах использовали микроволновое излучение с непрерывным режимом (частота 2,45 ГГц, средняя мощность ~36 кВт). По методу НРС частицы были получены с помощью установки NanoSprayDryer B-90 (Buchi, Швейцария). После синтеза все порошки отжигали при температуре 900 °С (1 час).

Площадь удельной поверхности частиц порошков определяли по методу БЭТ на установке Сорби-М (Мета, Россия). Метод лазерной дифракции с ультразвуковой обработкой суспензий был использован для оценки размеров частиц порошка на установке SALD-7101 (Shimadzu, Япония). Оценка фазового состава была выполнена посредством получения дифрактограмм на XRD-7000S (Shimadzu, Япония).

Расчет насыпной плотности производился по формуле

$$\rho = m/v. \quad (1)$$

В работе использовали оценку скорости коррозии посредством гравиметрических испытаний. Гравиметрические кривые строили на основании изменения массы стальных образцов в смеси концентрированных азотной и соляной кислот с концентрацией 2 : 3 : 5 = HNO_3 : HCl : H_2O , об. %. В качестве металлической подложки, используемой для исследования коррозионной устойчивости получаемых антикоррозионных составов, была выбрана сталь марки У8А, на поверхность которой наносилось коммерческое покрытие на основе водной дисперсии акрилового лака (ЗАО «Декарт»). Порошок MgAl_2O_4 ($C = 0.15$ % масс.) добавляли в дисперсию акрилового лака и проводили перемешивание с помощью вихревой мешалки и УЗ-ванны.

Результаты и обсуждения

На основании результатов анализа насыпной плотности (рис. 1) при одинаковой массе образца (1 грамм) установлено, что порошок, полученный методом НРС, имеет меньшую насыпную плотность (0,36 г/см³). Это подтверждает меньший размер частиц и развитую площадь поверхности по сравнению с методами фильтрации (1,06 г/см³) и СВЧ (0,85 г/см³).

По результатам рентгеновской дифракции было показано, что все материалы характеризуются шпинельной фазой и показывают значительные различия в размере областей когерентного рассеяния (ОКР). Результаты БЭТ и РФА представлены в табл. 1.

На рис. 2 показан средний размер частиц. Для порошка, полученного методом НРС, $D = 0,37$ мкм; для фильтрации – 0,60 мкм, а для СВЧ – 0,59 мкм. Из результатов анализа видно, что у порошка MgAl_2O_4 , полученного методом распылительной сушки, наблюдается значительная деагломерация во время УЗ-обработки по сравнению с другими методами, при которых размер частиц, как правило, существенно не изменяется.

На основании полученных результатов анализа порошок, полученный методом нанораспылительной сушки ($\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{-HPC}$), был выбран для дальнейшего исследования с целью оценки его эффективности в борьбе с коррозией.

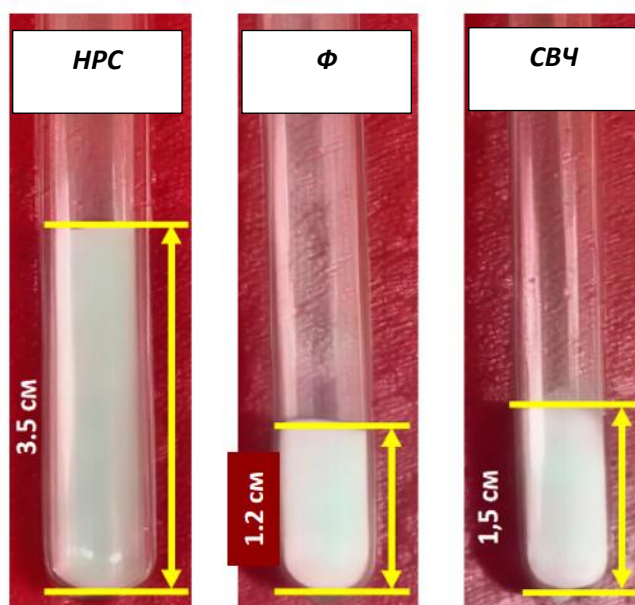


Рис. 1. Способы получения порошков

Таблица 1

Результаты РФА и БЭТ анализа порошков MgAl_2O_4

Методы	Фазовый состав, %	ОКР, нм	$S_{\text{уд}}, \text{м}^2/\text{г}$
HPC	$\text{MgAl}_2\text{O}_4 - 100$	10,13	$120,92 \pm 0,44$
Фильтрация	$\text{MgAl}_2\text{O}_4 - 100$	15,26	$95,05 \pm 3,11$
СВЧ	$\text{MgAl}_2\text{O}_4 - 100$	11,45	$113,34 \pm 0,20$

Для сравнения коррозионной эффективности порошка, полученного методом HPC, был выбран коммерческий порошок MgAl_2O_4 (Baikowski) полная характеристика которого была представлена в работе [9]. В табл. 2 и на рис. 3 даны результаты исследований по оценке наиболее эффективного антикоррозионного состава на основе коммерческого акрилового лака (АЛ) с включением частиц MgAl_2O_4 .

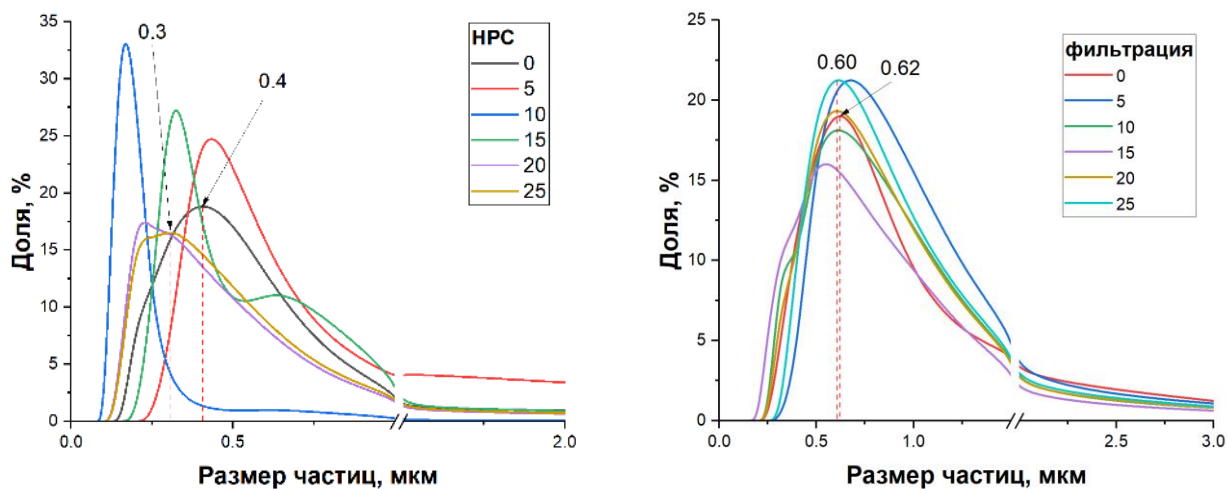


Рис. 2 (Начало). Размер порошков, рассчитанный на основании метода лазерной дифракции

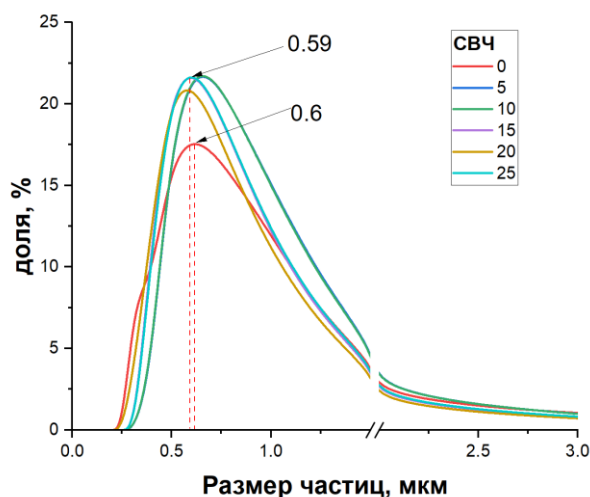


Рис. 2 (Окончание). Размер порошков, рассчитанный на основании метода лазерной дифракции

Таблица 2

Эффективность антикоррозионных составов на основе АЛ

Покрытие	η, %
	HNO ₃ -HCl
АЛ	58±34
АЛ-MgAl ₂ O ₄	94,5±1,5
АЛ-MgAl ₂ O ₄ -НРС	95,6±1,4

В составы на основе АЛ были включены два вида частиц: MgAl₂O₄ и MgAl₂O₄-НРС. По результатам гравиметрических тестов было показано, что самостоятельное использование АЛ приводит к росту остаточной массы стальных образцов. Включение в состав покрытия частиц MgAl₂O₄ данный показатель увеличивается. Наибольшую эффективность продемонстрировали частицы MgAl₂O₄-НРС.

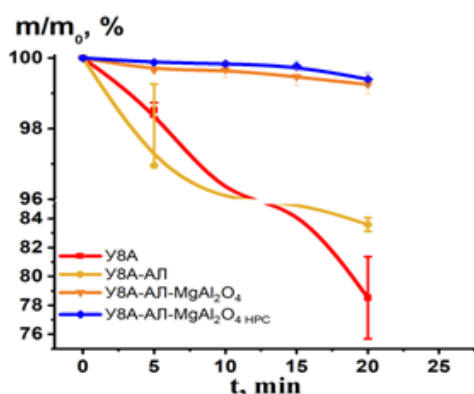


Рис. 3. Кривые травления стали У8А в смеси HNO₃-HCl с покрытием на основе коммерческого акрилового

Выводы

1. Удельная поверхность частиц, полученных нанораспылительной сушкой, фильтрацией и СВЧ, составляет 121, 95 и 113 м²/г соответственно.
2. РФА анализ порошков показал, что фазовый состав образуется только фазой шпинели после отжига при температуре 900 °С. Рассчитанные размеры ОКР, порошков, полученных нанораспылительной сушкой, фильтрацией и СВЧ составляет 10.13, 15.26, 11.45 нм, соответственно.

3. Размер нанопорошков, полученных нанораспылительной сушкой, фильтрацией и СВЧ, по данным лазерной дифракции составляет, 0,29, 0,60 и 0,59 мкм соответственно.

4. Порошок MgAl_2O_4 , полученный методом нанораспылительной сушки, обладает значительным потенциалом и имеет перспективу для применения в качестве функциональной добавки к антикоррозионным покрытиям.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП НОИЦ «НМНТ» ТПУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yeshanew, D.A. Internal Corrosion Damage Mechanisms of the Underground Water Pipelines / D.A. Yeshanew, M.G. Jiru, H.G. Lemu // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2022. – Vol. 16. – Iss. 3. – Pp. 111–123. – DOI: 10.12913/22998624/149369.
2. Ikechukwu, E.E. Environmental Impacts of Corrosion on the Physical Properties of Copper and Aluminium: A Case Study of the Surrounding Water Bodies in Port Harcourt / E.E. Ikechukwu, E.O. Pauline // *Scientific Research Publishing*. – 2015. – Vol. 3. – Pp. 143–150. – DOI: 10.4236/jss.2015.32019.
3. Shehnazdeep. A study on effectiveness of inorganic and organic corrosion inhibitors on rebar corrosion in concrete: A review / Shehnazdeep, B. Pradhan // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 65. – Iss. 2. – Pp. 1360–1366. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.296.
4. Ahmed, M.A. Current and emerging trends of inorganic, organic and eco-friendly corrosion inhibitors / M.A. Ahmed, S. Amin, A.A. Mohamed // *Royal Society of Chemistry*. – 2024. – Vol. 14. – Iss. 43. – Pp. 31877–31920. – DOI: 10.1039/d4ra05662k.
5. Anjum, M.J. Metal/metal oxide nanoparticles as corrosion inhibitors / M.J. Anjum, H. Ali, W.Q. Khan, J. Zhao // *Corrosion Protection at the Nanoscale*. – 2020. – Vol. 1. – Iss. 11. – Pp. 181–201. – DOI: 10.1016/B978-0-12-819359-4.00011-8.
6. Ezzeddin, B. An investigation into the effect of using different metal oxide nanoparticles on the anti-corrosion properties of coatings: a comparative study / B. Ezzeddin // *Moroccan Journal of Chemistry*. – 2024. – Vol. 12. – Iss. 2. – Pp. 657–675. – DOI: 10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v12i2.43008
7. Cunha-Duncan, F.N. Synthesis of magnesium aluminate spinels from bauxites and magnesias / F.N. Cunha-Duncan, R.C. Bradt // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2004. – Vol. 85. – Iss. 12. – Pp. 2995–3003. – DOI: 10.1111/j.1151-2916.2002.tb00569.x.
8. Zan, W. Preparation and performance optimization of MgAl_2O_4 spinel materials by single-step reaction / W. Zan // *Ceramic International*. – 2023. – Vol. 49. – Iss. 14, part A. – Pp. 23567–23578. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.04.191.
9. The particle size effect of CeO_2 on the structure and properties of MgAl_2O_4 spinel ceramics / V. Paygin, E. Dvilis, S. Stepanov [et al.] // *Ceramics International*. – 2025. – Vol. 51. – No. 1. – Pp. 331–338. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.10.464.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 4D-СТРУКТУР АРМИРОВАНИЯ

Шевченко С.^{1✉}, к.т.н., доцент, **Рожнятовский А.В.**¹, к.т.н., доцент,
Игнатьев О.Л.², к.т.н., доцент, **Коршенко К.В.**³, к.т.н., доцент, **Денисов Д.А.**, магистрант

¹ Филиал Самарского государственного технического университета,

г. Сызрань, Российская Федерация

² Ростовский государственный университет путей сообщения,

г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

³ Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова,

г. Луганск, Российская Федерация

E-mail: sfsamgtu@sfsamgtu.ru

Представлены результаты исследования механических характеристик модифицированной углеродной матрицы фрикционного материала 4D-структуры армирования. Выполнено математическое моделирование, при котором определены основные механические свойства С-С фрикционного материала, такие как модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона.

Ключевые слова: углерод-углеродные фрикционные композиционные материалы, 4D-структура армирования, механические характеристики модифицированной углеродной матрицы

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON-CARBON FRICTION MATERIALS OF 3D AND 4D REINFORCEMENT STRUCTURES

Shevchenko S.^{1✉}, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Rozhniatovskii A.V.¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Ignatiev O.L.², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Korshenko K.V.³, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Denisov D.A., Master's Degree student

¹ In the branch of Samara State Technical University in Syzran, Russian Federation

² Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

³ Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov, Lugansk, Russian Federation

E-mail: sfsamgtu@sfsamgtu.ru

The results of a study of the mechanical characteristics of a modified carbon matrix of a 4D friction reinforcement structure material are presented. Mathematical modeling has been performed, in which the basic mechanical properties of the C-C friction material, such as the modulus of elasticity, shear modulus and Poisson's ratio, have been determined.

Keywords: carbon-carbon friction composite materials, 4D reinforcement structure, mechanical characteristics of the modified carbon matrix

В последние годы наблюдается стабильное увеличение объемов грузовых перевозок железнодорожным транспортом по сравнению с автомобильным, что обусловлено повышением скоростных показателей движения поездов, а также экономическими и экологическими преимуществами. В связи с этим безопасность движения требует соблюдения строгих нормативных требований по длине тормозного пути, времени торможения и замедления, непосредственно зависящих от эффективности фрикционного материала тормозных систем. На основании исследований установлено, что модифицированные углерод-углеродные (С-С) композиционные материалы на основе углеродистой ткани УРАЛ ТМ-4 и УРАЛ Т-22 с пироуглеродной матрицей и абразивными модификаторами трения обеспечивают достаточно высокий коэффициент трения, но сейчас еще недостаточно исследованы их механические

свойства в различных структурах армирования. В работе ставится задача исследования механических свойств С-С фрикционных материалов со структурой 4D-армирования.

Исследование структур армирования композиционных материалов позволяет выявить общую закономерность: большинство анализируемых материалов содержат повторяющийся базовый элемент, представленный плоским слоем. Важной особенностью такого элемента, отличающей его от традиционного однонаправленного армированного слоя, является наличие волокон, ориентированных в двух разных направлениях. Причем 4D-структура армирования состоит из параллельных слоев материала 2D-структуры (при этом волокна третьего направления перпендикулярны данной плоскости расположения слоя 2D-структуры) и дополнительного направления волокон, расположенных под углом к основному слою. При этом волокна первого и второго слоев находятся в параллельных плоскостях, а волокна третьего направления перпендикулярны данной плоскости расположения первого и второго слоя. Обеспечение 4D-структуры армирования осуществляется за счет расположения дополнительного направления волокон под углом к основному слою [1]. Если не учитывать неоднородность структуры материала внутри каждого слоя, то при определении механических характеристик его деформационная модель может быть описана в виде смешанного слоя, состоящего из простых слоев, которые могут отличаться армирующими волокнами и их ориентацией в своей плоскости. Определение упругих свойств каждого слоя зависит от его структуры и компонентов, из которого он состоит. При определении упругих характеристик перпендикулярного слоя используется метод, сформированный на выражениях для расчета однонаправленного композитного материала с учетом свойств наполнителя и армирующих волокон, расположенных перпендикулярно главному направлению.

В процессе исследования механических параметров модифицированной углеродной матрицы было проведено математическое моделирование. Оно позволило определить основные механические свойства [2] углерод-углеродного фрикционного материала с 4D-структурой армирования. При сравнении значений модулей упругости по всем трем направлениям, которые теоретически должны быть одинаковыми, получено, что при отсутствии угла поворота слоя ($\theta = 0$) их различия незначительны и не превышают 3 % (рис. 1). Рассмотрение модуля упругости E_3 , который не должен изменяться в зависимости от угла поворота слоя, показал, что его расчетные значения остаются практически неизменными. Изучение круговых диаграмм изменения модулей упругости, полученных при моделировании в зависимости от угла поворота координатных осей, выявило их незначительные отличия в диапазоне 12–20°, при этом расхождения значений в этой области составляют до 5 %.

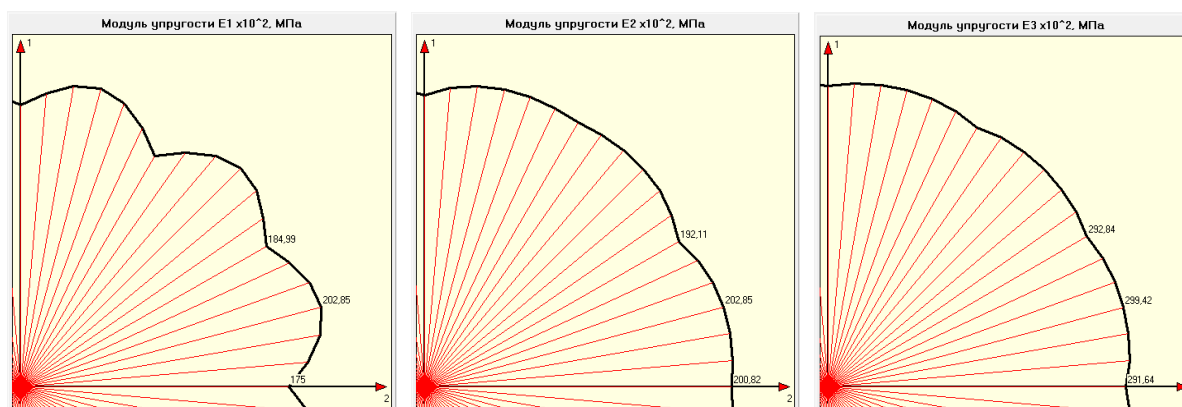


Рис. 1. Графические зависимости изменения модуля упругости по трем направлениям

Анализ модулей сдвига по всем трем направлениям (рис. 2) показал, что при угле поворота слоя $\theta = 0$ их значения совпадают по всем направлениям, при этом погрешность расчета составила около 3 %.

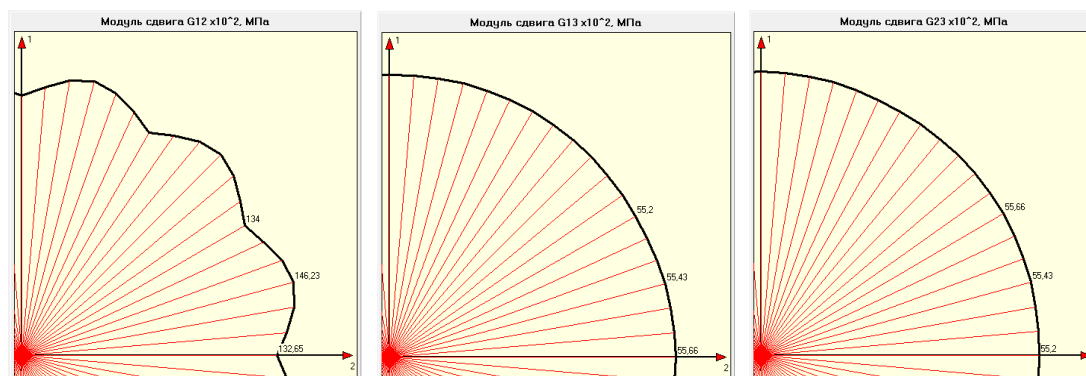


Рис. 2. Графические зависимости изменения модуля сдвига по трем направлениям

Оценивая результаты расчетов коэффициента Пуассона по модели в зависимости от угла поворота слоя по всем трем направлениям (рис. 3), можно сказать, что коэффициент Пуассона ν_{12} имеет такую же зависимость от угла, что и модуль сдвига в соответствующем направлении. Рассматривая коэффициенты Пуассона для остальных двух направлений ν_{13} , ν_{23} , можно сказать, что для них также характерна зависимость, как у E_1 и E_2 , с погрешностью не более 5 %.

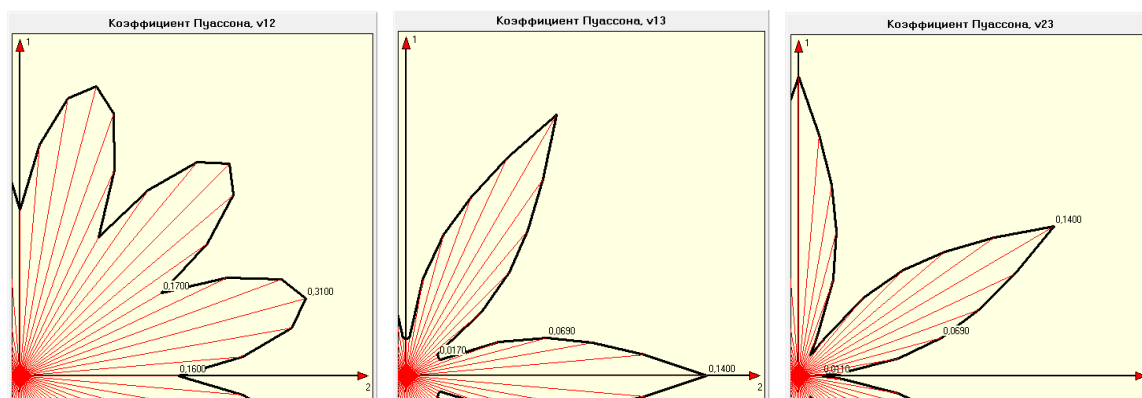


Рис. 3. Графические зависимости изменения коэффициента Пуассона по трем направлениям

В результате анализа исследований было установлено, что для плоского блока слоя материалов со структурой 4D-армирования степень армирования в плоскости слоя остается неизменной, а в перпендикулярном направлении слоя соответствует степени армирования в плоскости. Также следует отметить, что коэффициент Пуассона, модуль сдвига и модуль упругости для данной структуры материала могут быть определены с погрешностью не более 5 % с учетом ее уменьшения при увеличении абсолютных значений параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций / Ю.В. Соколкин, А.М. Вотинов, А.А. Ташкинов [и др.]. – Москва: Наука: Физматлит, 1996. – 240 с.
2. Колесников, С.А. Формирование физико-механических характеристик углерод-углеродных материалов при изостатической технологии получения углеродной матрицы / С.А. Колесников, Д.С. Максимова // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61, № 11. – С. 50–61.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Проектирование, эксплуатация и метрологическое обеспечение инструментальных систем и оборудования современных машиностроительных производств 3

<i>Боклаг Ю.Д., Иващенко Е.М.</i> Метрологический аспект оптических методов контроля с использованием автоколлиматора	3
<i>Буханов С.А.</i> Использование CMSolver для подбора основного технологического оборудования	7
<i>Воейко О.А., Воейко А.А.</i> Метод передачи единицы длины лазерным дальномерам в диапазоне длин от 0 до 300 м	11
<i>Денисенко А.Ф., Ладагин Р.В.</i> Генеративное проектирование шпиндельных узлов.....	16
<i>Елистратов К.М., Рогожников И.А.</i> Влияние выбора смазочно-охлаждающих технологических сред на качество поверхности при шлифовании	20
<i>Елхимов Д.А., Свистун М.И., Заякин О.А., Любошенко В.А., Котова С.П.</i> Макет портативного измерителя концентрации свободной воды в авиационном топливе	24
<i>Захаров О.В., Пимушкин Я.И., Сулейманова Ф.Д.</i> Оценка метрологических возможностей отечественной координатно-измерительной машины для измерения шероховатости	29
<i>Керимов У.Г.</i> Функциональная взаимозаменяемость и ее применение при конструировании хлопкоочистительных машин	32
<i>Копьяк Д.Г.</i> Расчет и сравнительный анализ режимов резания для протяжки из быстрорежущей стали и протяжки со сменными твердосплавными пластинами	35
<i>Кротинов Н.Б.</i> Профилирование круглых фасонных резцов с помощью цифрового 3D-моделирования	39
<i>Малкина И.В.</i> Метрологическое обеспечение контроля уровня вибрации опор двигателей силовых установок	45
<i>Михрютин В.В.</i> Расчет допустимой погрешности установки измерительных стрелочных приборов при автоматизированном оптическом считывании их показаний	49
<i>Михрютин В.В., Михрютин А.В.</i> Предпосылки разработки модели геометрического образа процесса стружкообразования при резании.....	54
<i>Садыхова М.Ш.</i> Инновационные решения в зерноуборочных комбайнах фирмы John Deere	59
<i>Сальников И.М., Пекарский Е.С.</i> Разработка конструкции сборного шлифовального круга	64
<i>Тагиева С.А.</i> Особенности точения тонкостенных металл-композитных конструкций с металлополимерным наполнителем	67
<i>Якимов М.В., Лопатин Е.В.</i> Оптимизация конструкции задней бабки токарного станка	71

Секция 2. Инновационные направления в науке и образовании 75

<i>Борисов М.А., Надеждина О.А.</i> Влияние марки сверхтвердого материала на шероховатость обработанной поверхности нержавеющей стали в условиях электрохимического шлифования	75
<i>Дында Е.П., Пустовых О.С.</i> Использование искусственного интеллекта при геймификации дисциплины «Введение в машиностроительные технологии»	79
<i>Зоткин И.А.</i> Методы и приборы для контроля качества поверхности изделий аддитивного производства	83
<i>Ибатуллин И.Д., Новиков В.А., Копытин Д.О., Шальнова Д.Э.</i> Инновационный копер для циклических ударных испытаний на усталость PDC-резцов буровых долот	88

<i>Карасев Н.И., Галлямов А.Р.</i> Влияние паразитной тензочувствительности аппаратной части измерительных каналов на точность измерений в машинах трения	92
<i>Литовка О.В., Левко В.А.</i> Рабочая среда с комплексным пластификатором для обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых материалов	97
<i>Ляпнев Е.А., Жираковский Р.А., Тимофеева А.А.</i> Инновационные подходы к дистанционному обучению в машиностроении с использованием симуляторов производственных процессов	100
<i>Малиновский Д., Шарков О.В.</i> Влияние смещения пятна фрикционного контакта на изменение триботехнических характеристик тормозных устройств.....	104
<i>Мамбве М.М.</i> Турбулентный поток теплопередачи и потери давления в S-KP-теплообменнике с внутренними кольцевыми ребрами.....	107
<i>Наговицын И.И., Шиляев С.А.</i> Повышение технологичности корпусных деталей газоперекачивающих агрегатов на этапе конструкторско-технологического проектирования	111
<i>Новиков В.А., Акоюн А.А., Пашина Т.В.</i> Устройство для определения твердости горных пород.....	116
<i>Прокопенко А.К., Корнеев А.А., Кещян Г.В., Еремеев С.В., Гапонов В.Г.</i> Триботехнологии на основе «эффекта безызносности» для увеличения срока службы трущихся деталей машин и мобильных технических средств с двигателем внутреннего сгорания.....	121
<i>Сысоева Л.П., Левко В.А.</i> Рекомендации по выбору вида наполнителя рабочей среды для обработки абразивным потоком деталей из алюминиевых сплавов	126
<i>Терлыч С.В., Костоманов Д.А.</i> Определение степени карбонизации топлива	129
<i>Фам Т.К., Рассохин В.А.</i> Анализ конструкционных и технологических решений центробежного компрессора малорасходного газотурбинного гибридного двигателя	132
Секция 3. Цифровые технологии в машиностроении и промышленном дизайне	136
<i>Болдырева А.С., Болдырев Е.С., Носов Н.В.</i> Исследование влияния толщины детонационного покрытия на относительную опорную поверхность детали	136
<i>Бражникова А.М.</i> Методика компьютерного моделирования динамики роликовых подшипников с учетом изнашивания	140
<i>Вильданов А.Г., Демьянов Д.Н.</i> Прогнозирование результатов испытаний на вибропрочность кабин грузовых автомобилей с использованием методов машинного обучения.....	143
<i>Воронецкий Н.М., Носов Н.В.</i> Проектирование универсального сверлильного приспособления	147
<i>Гаспарова Л.Б., Нигматуллин А.Р.</i> Разработка web-ресурса как инструмента повышения конкурентоспособности образовательной программы	151
<i>Гатауллин А.Р., Демьянов Д.Н.</i> Моделирование управляемой пневматической подвески грузового автомобиля	154
<i>Говорков А.С., Фокин И.В.</i> Оптимизация загрузки цехов машиностроительного предприятия на основе математической модели расщепки	159
<i>Горяинов Д.С., Балашов И.В.</i> Реализация принципов групповой технологии в NX CAM при разработке технологических процессов обработки на станках с ЧПУ деталей типа «крышка гидроцилиндра».....	164
<i>Горяинов Д.С., Удовик А.Е.</i> Прогнозирование себестоимости обработки детали на основе ее геометрической модели.....	167
<i>Гордиенко Я.М., Гришин Р.Г.</i> Влияние количества режущих элементов прерывистого шлифовального круга на макрогеометрию обрабатываемой поверхности	170

<i>Гудимова Л.Н., Леммермайер Д.А.</i> Структурный синтез, моделирование и изготовление физической модели самоустанавливающегося механизма методом Fused Deposition Modeling	175
<i>Долгов А.Б., Никифоров А.А., Бочкарев П.Ю.</i> Создание цифрового двойника описания деталей и технологических возможностей оборудования фрезерной группы	180
<i>Ерисов Я.А., Разживин В.А., Петров И.Н., Смальцер А.В., Болдырев Д.П.</i> Исследование влияния угла наклона образующей на формирование остаточных напряжений при инкрементальном формообразовании.....	184
<i>Злотников Е.Г., Афанасьев И.А., Струначев А.С.</i> Преимущества использования цифровых двойников на машиностроительных предприятиях.....	188
<i>Карасев Н.И.</i> Влияние геометрических параметров измерительного моноблока на метрологические характеристики каналов нагрузки машины трения.....	191
<i>Киселева М.И., Родионов В.А.</i> Разработка 3D-модели органайзера.....	196
<i>Кладовщиков С.В., Пузанкова А.Б.</i> Виртуальная и дополненная реальность в машиностроении	199
<i>Козиков А.А., Родионов В.А.</i> Проектирование деревянного кресла сложной формы с применением 3D-моделирования.....	202
<i>Кордюков А.В.</i> Исторический анализ и новые подходы к автоматизации проектирования технологических процессов в мелкосерийном производстве	205
<i>Косульников А.С., Кордюков А.В.</i> Агентно-ориентированный подход для задач автоматизированного проектирования технологических операций.....	210
<i>Котов А.К., Лагута В.С., Овсянников М.В.</i> Многоуровневая система управления гибкой производственной системой «Denford» на основе архитектуры Edge-Fog-Cloud.....	214
<i>Михайлов А.Н., Огренич Д.В.</i> Некоторые особенности технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора газотурбинного двигателя	217
<i>Михеева Н.В., Тимофеев А.Н., Воейко О.А., Неряхин В.С.</i> Концептуальная модель управления качеством изделий, полученных прямым лазерным выращиванием	223
<i>Назаров Д.В.</i> Цифровой двойник микрорельефа поверхности на основе модели, связывающей текстуру и свойства.....	228
<i>Порфирьева А.В., Подкругляк Л.Ю.</i> Разработка 3D-модели аксессуара для наушников	233
<i>Преображенский А.П., Исакова С.М., Федосенко А.В., Тихонов И.А.</i> Управление киберфизической системой в машиностроительном производстве	237
<i>Рогожников И.А., Елистратов К.М.</i> Влияние режимов резания на стойкость абразивных кругов при шлифовании лопаток газотурбинных двигателей	240
<i>Скворцов А.Н.</i> Перспективные методы получения заготовки и конечно-элементное моделирование напряженного состояния измененной клапанной пружины ВАЗ-2108-1007020 на основе конструкторско-технологического подхода	244
<i>Трофименко Н.Г.</i> Моделирование шероховатости криволинейных поверхностей при обработке на станках с ЧПУ	249
<i>Трофименко Н.Г., Носов Н.С.</i> Шероховатость при высокоскоростной обработке деталей на станках с ЧПУ	254
<i>Туляков В.В., Степанов Д.В.</i> Разработка теоретической модели данных для преобразователя интерфейсов общего вида.....	258
<i>Туляков В.В., Степанов Д.В.</i> Разработка модели приложения преобразователя интерфейсов для системы коммерческого учета электроэнергии на основе встраиваемой платформы ESP32	261

<i>Услин Д.А., Родионов В.А.</i> Разработка 3D-модели предмета интерьера.....	266
<i>Чеканов В.С., Назаров Д.В.</i> Методика измерения и способы стабилизации частоты собственных колебаний рабочих лопаток компрессора	269
<i>Штопина Ю.А., Воронин В.Н.</i> Разработка формообразующих элементов средств производства для деталей сложной формы	274
<i>Шульга Д.М., Воронин В.Н.</i> Разработка дизайн-концепции органайзера для хранения игровых кубиков.....	278
<i>Шульга Д.М., Подкружляк Л.Ю.</i> Разработка дизайна и технологии изготовления художественного изделия «Кафф в исторической тематике»	282
Секция 4. Материаловедение и металлургия в современном машиностроении	286
<i>Аникеев В.В., Куликов М.И.</i> Изучение причин образования трещин в отливке «Корпус бурового ключа» из стали марки 35ГЛ	286
<i>Бедретдинов И.Р., Никитин К.В.</i> Основные дефекты сварных соединений и причины их возникновения в процессе изготовления и эксплуатации корпусных конструкций судов	291
<i>Бойко К.С., Малышев В.Н.</i> Применение анодной электролитно-плазменной обработки для стали 09Г2С.....	296
<i>Бутенко В.И.</i> Состав и свойства упрочненных поверхностных слоев деталей при использовании йодосодержащей смазочной композиции.....	300
<i>Глушников В.А., Землянкина А.В.</i> Возможность изменения пористости металлопорошковых материалов образцов, полученных лазерным сплавлением	305
<i>Григанов А.С., Мешков А.А., Баранов Д.А., Жаткин С.С.</i> Технология производства выплавляемых моделей с применением полимерной модельной оснастки, изготовленной методом аддитивных технологий	309
<i>Грищенко Е.Р., Лупанов Р.М., Бануляк А.В., Кривенков А.О.</i> Влияние термической обработки на свойства литой стали 20ГМЛ	314
<i>Елагина О.Ю., Танасенко М.С.</i> Влияние хлорид-ионов на коррозионную стойкость Сг-Мп аустенитных немагнитных сплавов	317
<i>Илларионов Д.В., Мешков А.А., Исаев С.Л., Негодяев В.О., Тимошкин И.Ю.</i> Особенности формирования структуры и свойств металлопорошковой композиции марки 12Х18Н10Т при наплавке на жаропрочную мартенситную сталь марки 13Х14Н3В2ФР-Ш.....	321
<i>Каракич Е.А., Умеров Э.Р., Амосов А.П., Кадямов Ш.А., Ибатуллин И.Д.</i> Исследование зависимости механических характеристик композитов системы TiC–Cu, полученных методом СВС-инфильтрации, от марки углерода	326
<i>Карев В.Г.</i> Селективное лазерное плавление в производстве штамповой оснастки.....	331
<i>Киричек А.В., Котлярова И.А., Макаренко К.В., Зенцова Е.А., Котляров М.М.</i> К вопросу классификации пор, возникающих в процессе электродугового аддитивного синтеза заготовок.....	335
<i>Клятченко Е.В., Курдюков А.В., Пак А.Я.</i> Влияние концентрации углерода на энергетические параметры при синтезе боридов вольфрама на электродуговом реакторе	339
<i>Куликов В.Ю., Квон Св.С.</i> Исследование структуры и свойств двухслойных покрытий	342
<i>Латин И.В., Захаров А.С., Гильмутдинов И.М.</i> Структурно-ориентированное моделирование прессования порошкового алюминия с карбонатом кальция как порофоров.....	345
<i>Максимук А.В., Берков Д.В., Майдан Д.А., Пуларгин Д.А.</i> Оценка качества внутренних защитных покрытий насосно-компрессорных труб при помощи электрохимической ячейки высокого давления.....	349

<i>Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С.</i> Особенности термической обработки стали 12Х17Г9АН4 для деталей авиационной техники.....	353
<i>Нгуен Ш.Х., Иванов С.Г.</i> Влияние термоциклической обработки на микроструктуру и свойства хромсодержащей высокомарганцевистой стали	356
<i>Панов А.Г., Гуртовой Д.А., Балдин С.В.</i> Влияние времени изотермической выдержки на циклическую долговечность изотермически закаленного высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.....	361
<i>Пархоменко А.В., Амосов А.П., Пастухов А.М.</i> Практическая реализация производства отечественных металлополимерных гранулятов для технологии инжекционного формования металлических порошков в условиях машиностроительного предприятия.....	366
<i>Поздеева А.Ю., Амосов А.П., Юдин П.Е.</i> Пропитывание газотермического покрытия металлическими материалами.....	370
<i>Полтаракова Р.А., Ильященко Д.П.</i> Восстановление участков магистрального трубопровода, пострадавших от коррозии, путем проведения ремонтных работ с применением технологии дуговой сварки плавлением.....	375
<i>Романова Н.В., Шафигуллин Л.Н., Габдрахманов А.Т., Насыров И.А.</i> Полимерные композиции на основе полиэтилентерефталатгликоля для гранульной 3D-печати формовочной оснастки для стеклопластика.....	378
<i>Разживин В.А., Фадеенков И.П., Ковалева Д.А., Глуценков В.А.</i> Оценка напряженно-деформированного состояния материала образцов через испытание на микротвердость	382
<i>Тимошкин И.Ю., Торпищева О.Н.</i> Разработка технологии получения слитка из сплава СИЛ-1С литьем погружением	385
<i>Устинов П.Н., Родионов И.В.</i> Исследование влияния непрерывной лазерной наплавки WC на характеристики поверхностного слоя нержавеющей стали 12Х18Н10Т	389
<i>Учуватова Д.А., Маричева Е.А., Яблонский А.Н., Левшонков Н.В.</i> Разработка технологии производства складной хвостовой балки БПЛА типа «автожир»	393
<i>Чжан С., Гурьев А.М.</i> Влияние боротитанирования на структуру и твердость поверхности стали 12Мп.....	398
<i>Чэнь Сяпин, Илела А.Э.</i> Синтез и применения порошков $MgAl_2O_4$ в качестве антикоррозионного агента.....	402
<i>Шевченко С., Рожнятовский А.В., Игнатъев О.Л., Коршенко К.В., Денисов Д.А.</i> Исследование механических свойств углерод-углеродных фрикционных материалов 4D-структур армирования	407

Научное издание

Отв. ред. ГАЛЛЯМОВ Альберт Рафисович

Высокие технологии в машиностроении

Используемое программное обеспечение:
Windows XP, Vista, Adobe Acrobat Reader

Редактор *Е.С. Захарова*
Компьютерная верстка *И.О. Миняева*
Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подписано к использованию 13.05.26

Объем издания 17,57 Мб

Тираж 10 CD-R. Рег. № Е1/26

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус