

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

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

10–12 апреля 2024 г.

**Самара
Самарский государственный технический университет
2024**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Материалы XXI Всероссийской
научно-технической конференции
с международным участием

10–12 апреля 2024 г.

Самара
Самарский государственный технический университет
2024

Печатается по решению методического совета факультета машиностроения, металлургии и транспорта СамГТУ (протокол № 8 от 06.03.2024 г.).

УДК 621(06)
ББК 34.4я4
В 932

Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 10–12 апреля 2024 г. / Отв. ред. *А.Р. Галлямов*. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2024. – 315 с.

ISBN 978-5-7964-2445-2

Сборник содержит тезисы докладов участников XXI Всероссийской научно-технической конференции 2024 г. по следующим основным направлениям: цифровые технологии при проектировании в машиностроении, прогрессивные технологические процессы в машиностроении, проектирование, эксплуатация и диагностика инструментальных систем и оборудования для современных машиностроительных производств, материаловедение и металлургия в современном машиностроении.

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

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. Ярьсько*,
канд. техн. наук *А.Р. Галлямов*,
канд. техн. наук *Л.Б. Гаспарова*,
канд. техн. наук *Р.Г. Гришин*,
канд. техн. наук *Д.А. Майдан*,
О.А. Младенцева (отв. секретарь)

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор *Д.И. Панюков*,
д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой технологий производства двигателей ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» *А.И. Хаймович*

УДК 621(06)
ББК 34.4я4
В 932

ISBN 978-5-7964-2445-2

© Авторы, 2024
© Самарский государственный
технический университет, 2024

Секция 1. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 629.7.01

ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА

Аглиуллина Э.А., студент

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация
E-mail: aea23022003@gmail.com*

*Представлены результаты оптимизации процесса цифрового проектирования сварных и цельно-
нотянутых трубопроводов с помощью методики реверс-инжиниринга.*

*Ключевые слова: реверс-инжиниринг, трубопровод, 3D-сканирование, самолетостроение, циф-
ровое проектирование*

OPTIMIZATION OF DIGITAL DESIGN OF PIPELINES OF VARIOUS CONFIGURATIONS USING REVERSE ENGINEERING METHODS

Agliullina E.A., student

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation
E-mail: aea23022003@gmail.com*

*The results of optimization of the process of digital design of welded and seamless pipelines using
reverse engineering techniques are presented.*

Keywords: reverse engineering, pipeline, 3D-scanning, aircraft engineering, digital design

В последние годы цифровые методы проектирования стали все более популярными в различных отраслях промышленности, включая проектирование трубопроводов в авиастроении. Инновационные технологии позволили создавать электронные модели (ЭМ), которые отображают конфигурацию трубы и позволяют оптимизировать процесс проектирования и, как следствие, ускорить изготовление и монтаж трубопроводов. В данной статье исследуются методы цифрового проектирования трубопроводов с целью оптимизации процесса. Рассматриваются основные этапы цифрового проектирования трубопроводов различной конфигурации. Подбираются и описываются оптимальные методы аппроксимации эталона трубы методом реверс-инжиниринга.

Современное технологическое обеспечение, такое как CAD-системы (например, Siemens NX, Geomagic Design X), облегчают процесс моделирования трубопроводов. Подобное цифровое производство позволяет проводить виртуальное тестирование системы трубопроводов на предмет эффективности работы и выявления возможных проблем уже на этапе проектирования. Благодаря использованию цифровых технологий можно значительно сократить время разработки и монтажа трубопроводов, а также повысить их надежность и эффективность. Более того, цифровое проектирование трубопроводов позволяет создать оптимальные и экономически эффективные решения для монтажа системы трубопроводов в летательных аппаратах.

Важным этапом цифрового проектирования труб является анализ расположения компонентов системы и определение оптимального пути трубопровода [1]. При помощи специализированных программных средств можно моделировать прохождение трубопроводов через сложные конструкции и учесть особенности окружающего пространства, однако при

сборке основных компонентов самолета, таких как фюзеляж, крылья и хвостовая часть, возникают погрешности в размерах объектов обстановки трубопровода, что усложняет или вовсе делает невозможным изготовление и монтаж труб по идеальным электронным моделям, так как они были спроектированы под идеальные размеры рядом стоящих элементов и могут не подойти под реальные оставленные для них ниши. Из этого следует, что изготовление и монтаж трубопроводов является сложной технологической задачей, связанной с размещением магистралей в ограниченном пространстве по причине плотной компоновки внутри летательного аппарата [2]. Одним из ключевых этапов в цифровом проектировании трубопроводов может стать аппроксимация эталонных моделей. Это позволит адаптировать их к цифровым методам производства и создать электронные модели, которые могут быть использованы для оптимизации процесса изготовления и монтажа труб.

Вследствие этого приходим к необходимости сканирования уже имеющейся эталонной базы и аппроксимации с электронными моделями, полученными в ходе цифрового проектирования. Данный метод поможет ускорить изготовление и монтаж трубопроводов в условиях серийного производства самолетов.

Рассмотрим способы проектирования трубопроводов:

1. Проектирование моделей трубопроводов в электронной модельной обстановке и последующее изготовление по ЭМ.

Проектирование трубопроводов самолета в электронной модельной обстановке представляет собой процесс создания детальных трехмерных моделей трубопроводов, используемых в самолете (рис. 1). Это позволяет инженерам эффективно планировать и оптимизировать конструкцию, учитывая различные факторы, такие как вес, прочность, гидродинамические и термодинамические характеристики, а также возможное взаимодействие с другими системами самолета. Используя электронную модель, инженеры могут проводить виртуальные тесты и анализы, чтобы выявить потенциальные проблемы до начала физического производства.

Трубопровод, изготовленный по идеальной электронной модели, не может быть установлен в случае неточной сборки каркаса, поэтому для использования этого метода должны быть исключены погрешности при производстве, что в нынешних реалиях сложно достижимо.

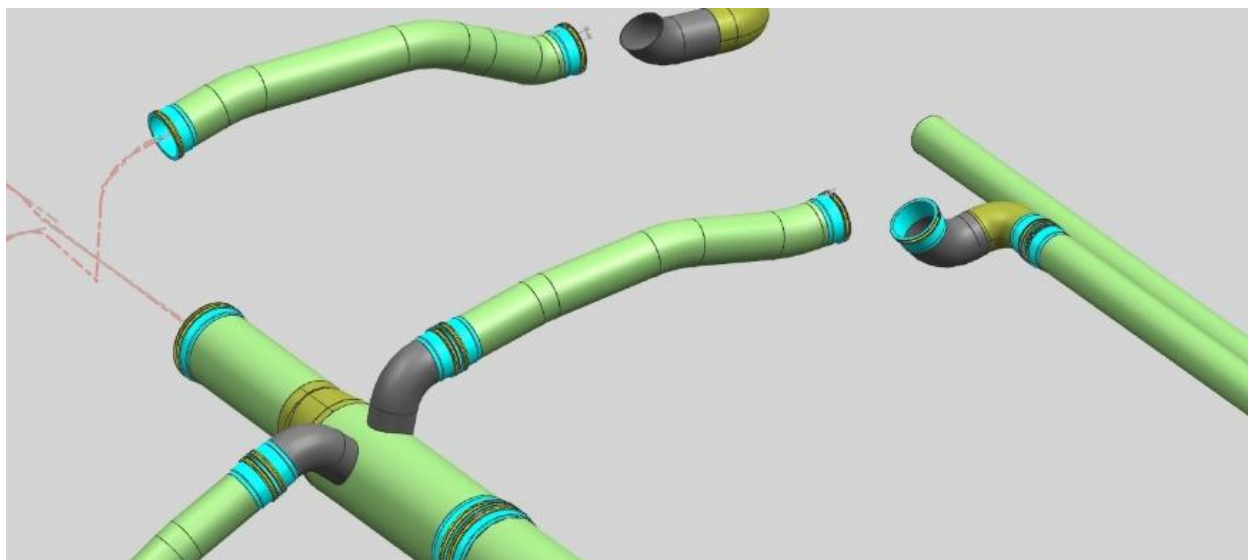


Рис. 1. Электронная модель части топливной системы самолета

2. Изготовление по эталонам.

Эталон трубы – это изделие, которое создано по уже существующей и установленной на самолет трубе (рис. 2). Используется для определения и проверки габаритных размеров и формы идентичных деталей [3]. Этот инструмент служит для контроля соответствия изготовленного изделия установленным требованиям по размерам, что позволяет обеспечить

высокую точность и качество изготовления авиационных компонентов. Отсюда следует, что благодаря эталонной базе мы можем не только изготавливать детали по известным размерам, но и в последующем проводить проверки их габаритов. С развитием технологий и появлением новых способов измерения, таких как 3D-моделирование и цифровой контроль размеров, популярность эталонов трубы снизилась. Однако, как было выявлено ранее в статье, идеальные электронные модели не всегда способны полностью заменить эталоны реальной трубы, и несмотря на появление новых технологий, эталонная база трубопроводов все еще остается важным инструментом и будет использоваться для обеспечения высокой точности и качества изготовления авиационных компонентов.

Проектирование трубопроводов самолета лишь по эталонам без внедрения цифровых методов производства будет не настолько эффективно. Ведь как минимум для последующего производства деталей необходимо использование трубогибочного станка (для цельнотянутых) и цифровых универсальных сборочных приспособлений (для сварных), для которых необходима электронная модель. Изготовление по эталонам имеет смысл лишь совместно с цифровыми методами проектирования.



Рис. 2. Эталон части трубопроводной системы

3. Аппроксимация эталонов

Аппроксимация эталонов – это процесс создания электронной модели эталонов, отображающих реальную конфигурацию трубы и адаптацию к цифровым методам производства.

3.1. Аппроксимация цельнотянутых трубопроводов

Цельнотянутые трубы – это вид трубопроводов, изготовленных из сплавов металлов или других материалов путем однократного тягового прессования, или экструзии [4]. Они характеризуются отсутствием сварных швов и имеют более высокую прочность и устойчивость к различным воздействиям. Основное достоинство данной категории заключается в ее герметичности, а также в исключении всех негативных последствий, связанных с использованием сварных соединений, таких как остаточные напряжения, микроскопические неровности и наплывы.

Оптимальным методом получения геометрии трубы в ходе практических опытов оказался метод сканирования в Aicon 16 (система, предназначенная для бесконтактного трехмерного измерения) с получением оси трубопровода.

Технология аппроксимации цельнотянутых трубопроводов:

1. Скан эталона загружается в системы CAD.
2. Строится осевая линия трубопровода.
3. На основе имеющихся траекторий строится новая осевая линия, удовлетворяющая требованиям по гибке на станках с ЧПУ, а именно задаются радиусыгиба и минимальные длины прямых участков (рис. 3).

4. Электронная модель эталона трубы проверяется на возможность монтажа.

Результатом аппроксимации является перевод изготовления трубопроводов по эталонам на изготовление по электронным моделям на трубогибочном станке Maci Provar 6-90 U-D методами обкатки и намотки.

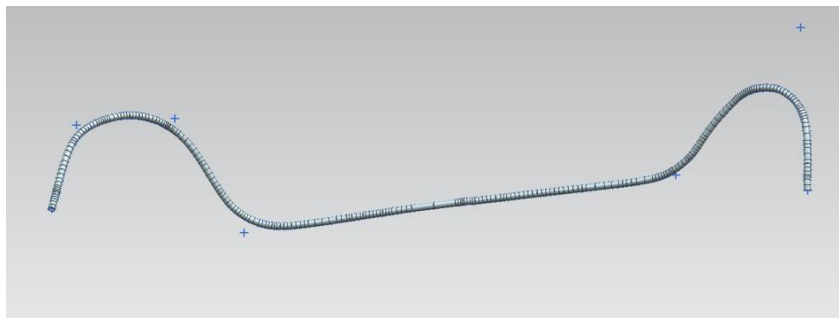


Рис. 3. Электронная модель цельнотянутого трубопровода, выполненная в программе Siemens NX 10

3.2. Аппроксимация сварных трубопроводов

Сварные трубы – это трубы, изготовленные на трубосварочном стане путем сварки кромок трубной заготовки, сформованной из полосы, листа или ленты [4]. Данный способ используется на Казанском авиационном заводе для труб с переменным диаметром или деталей с несколькими ответвления. С помощью этого метода можно получить трубы сложной формы, которые сложно или невозможно получить натяжкой трубы.

В данном случае невозможно использовать тот же метод сканирования, как в случае с цельнотянутыми трубопроводами, так как Aicon 16 не может зафиксировать ось у труб сложной формы с множеством изгибов в разных плоскостях, у труб с переменным по длине диаметром и при наличии хотя бы одного ответвления от основной оси.

Для сканирования сварных трубопроводов важно зафиксировать место сварки и ось. Таким образом, оптимальный по времени вариант связан с использованием ручного сканера ROMER ABSOLUTE ARM 7530SI с точностью сканирования $\pm 0,084$ мм, повторяемость точек $\pm 0,03$ [5], с получением облака точек.

Технология аппроксимации сварных трубопроводов:

1. Скан эталона загружается в систему CAD.
2. В программе Geomagic Design X обрабатывается облако точек, а именно проводится построения сетки (рис. 4).
3. Получаются торцевые плоскости выходов трубопровода и определяются осевые линии, указывается расположение сварных соединений.
4. Электронная модель эталона трубопровода проверяется на допустимость отклонений и возможность монтажа.

В данном случае аппроксимация сварных трубопроводов позволяет перевести их изготовление на производство по электронной модели на цифровом универсальном приспособлении (ЦУСП), которое исключает из цикла производства изготовление металлической оснастки, так как является пересобираемым.

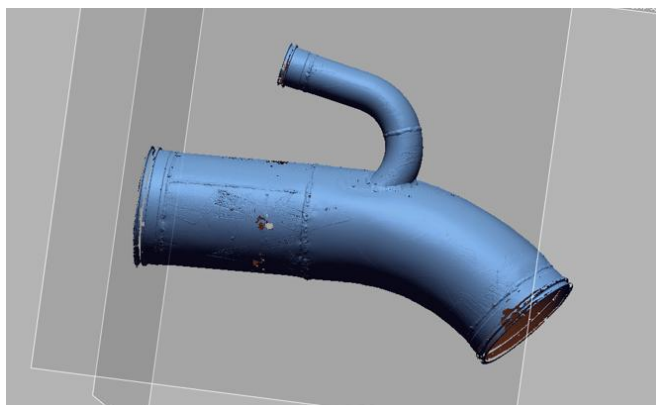


Рис. 4. Электронная модель сварной трубы с ответвлением, выполненная в программе Geomagic Design X

Таким образом, подход, предполагающий сканирование имеющейся эталонной базы и аппроксимацию с использованием электронных моделей, полученных в ходе цифрового проектирования, позволит перевести производство цельнотянутых труб на изготовление на трубогибочном станке, а сварных – на ЦУСП. Данные методы производства позволят улучшить точность сборки и ускорить процесс монтажа трубопроводов в условиях массового производства самолетов на Казанском авиационном заводе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т. 1 / Под ред. И.Н. Жестковой. 9-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2006. 928 с.
2. Феоктистов С.И. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2013. 88 с.
3. ОСТ 92-1600–84. Производство трубопроводов. Общие технические условия. Эталонирование трубопроводных систем, гибка труб и формообразование концов трубопроводов. Введен: 01.01.1986. 54 с.
4. Герасимов Е.Н. Стальные трубы сварные или бесшовные? // Экспозиция Нефть Газ. 2008. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stalnye-truby-svarnye-ili-besshovnye> (дата обращения: 05.03.2024).
5. 3D-control measuring systems: официальный сайт. Калуга, 2023. URL: <https://3dcontrol.ru/> (дата обращения: 20.02.2024).

РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Абрамова О.К., студент

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

Создан эскиз и разработана 3D-модель изделия «Органайзер для ювелирных изделий», определены назначение изделия и его художественный стиль, выбран материал и выявлены его преимущества, такие как прочность, долговечность и эстетические качества, определен способ изготовления с учетом особенностей геометрии и материала изделия.

Ключевые слова: органайзер, готический стиль, обработка изделия, мебельный щит, 3D-моделирование, способ изготовления, лазерная резка

DEVELOPMENT OF A 3D MODEL AND TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING PRODUCTS WITH CURVED SURFACES

Abramova O.K., student

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

A sketch was created and a 3D model of the "Jewelry Organizer" product was developed, the purpose of the product and its artistic style were determined, the material was selected and its advantages were identified, such as strength, durability and aesthetic qualities, the manufacturing method was determined taking into account the characteristics of the geometry and material of the product.

Keywords: organizer, Gothic style, product processing, furniture panel, 3D modeling, manufacturing method, laser cutting

Ювелирные изделия играют существенную роль в формировании нашего облика и являются важным аспектом нашей повседневной жизни. Мы стремимся к подбору идеальных аксессуаров, таких как браслеты, кольца, серьги и цепочки, которые отражают нашу индивидуальность и уникальный стиль. Однако накопление большого количества украшений может вызвать неудобства, например, их запутывание, потерю или повреждение. В таких ситуациях использование подставки для бижутерии оказывается эффективным решением, обеспечивающим удобство, стиль и сохранность украшений.

В области дизайна интерьера готический стиль характеризуется сложностью форм, обилием ажурных узоров, приглушенными оттенками и большим количеством декоративных элементов. Изделие в таком стиле добавит интерьеру выразительности и колорита благодаря использованию дорогих материалов – ценных пород дерева. Готический стиль тесно связан с историческим контекстом и точно не оставит равнодушными жителей и посетителей дома, ценящих культурное наследие [1].

При разработке эскиза органайзера мы постарались передать характерные черты готического стиля в его форме, ажурных узорах, напоминающих архитектуру Собора Парижской Богоматери. Эскиз был выполнен в графическом редакторе Adobe Photoshop (рис. 1, 2).

Мы выбрали программу SolidWorks для моделирования, так как она имеет все необходимые функции для реализации проекта, включая интерфейс на русском языке, возможность работы с криволинейными поверхностями и функцию рендеринга. Мы используем SolidWorks для создания нескольких моделей, которые затем объединяются в сборку (рис. 3).

Материалом для изготовления изделия служит мебельный щит из массива дуба. Этот материал выбран неслучайно, в Соборе Парижской Богоматери все стропила, балки, тяги

выполнены именно из дуба. Таким образом, использование данного сырья подчеркнет связь с традицией и историей исполнения архитектурных деталей сооружений в готическом стиле. Это придаст изделию особую эстетику и символическое значение, олицетворяя древние традиции и искусство мастеров-ремесленников. Современный материал, изготовленный путем склеивания ламелей из массива дуба под высоким давлением, обладает высокой прочностью и стабильностью во времени.

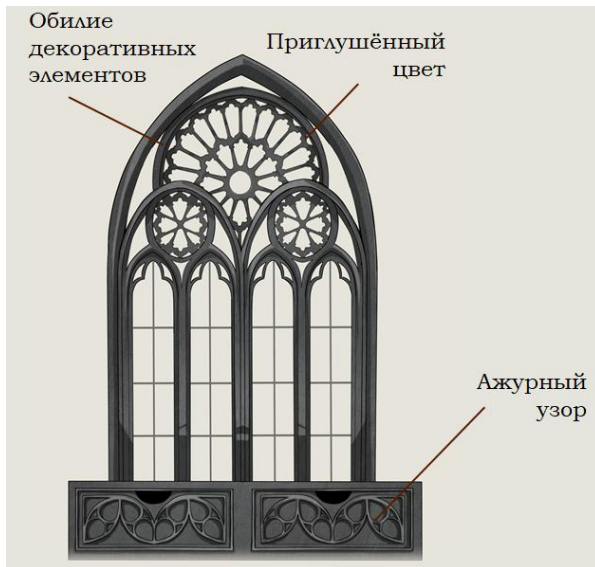


Рис. 1. Эскиз органайзера для ювелирных изделий

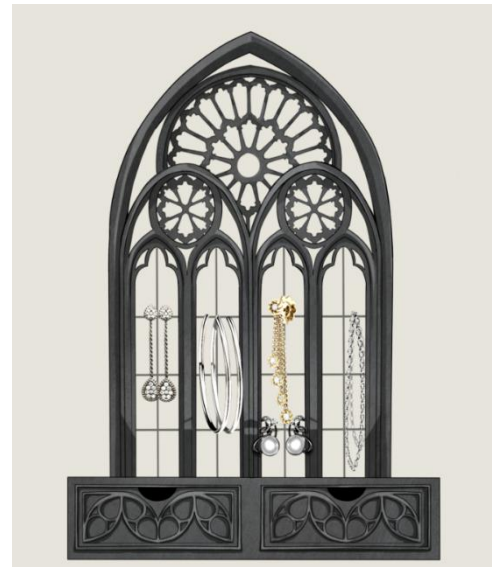


Рис. 2. Пример использования органайзера



Рис. 3. Реалистичная визуализация модели органайзера

Обработку изделия можно выполнить в программе Siemens NX после экспорта модели из SolidWorks, что позволит производить фрезеровку на специализированных станках с ЧПУ. Эта технология дает возможность создавать высококачественные изделия с оригинальным орнаментом и минимальным количеством брака. Она обеспечивает точность обработки, экономию материала и широкие возможности для создания различных предметов интерьера, мебели и других изделий [2].

На следующем этапе выполним лазерную резку для изготовления верхней части органайзера на станке CO2 КАМАЧН II 1060 AS. Преимущества этого метода включают в себя автоматизацию процесса обработки по предварительно заданному алгоритму, исключающую возможность ошибок из-за человеческого фактора. Благодаря этому методу разрезы получаются ровными и гладкими без необходимости дополнительного шлифования. Также возможно создание сложной геометрии, так как станок способен выполнить микроразрезы

шириной от 0,01 мм. Дерево обрабатывается без деформации, сохраняя эстетические свойства материала, и при необходимости можно сразу же создать затемнение материала в области разреза путем воздействия высокой температуры [3].

Таким образом, в ходе работы выполнены эскиз, 3D-модель и ее реалистичная визуализация, выбран материал для будущего изделия и способ его изготовления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Панофский Э. Готическая архитектура и схоластика. В кн.: Богословие в культуре средневековья. Киев: РусАрх, 1992. 250 с.
2. Родионов В.А., Солодова Н.О. Моделирование обработки матрицы для получения рельефного оттиска на тонколистовом материале // Молодежная наука: вызовы и перспективы: матер. II Всерос. научно-практ. конф. студентов и молодых ученых. Сызрань, 2019. С. 128–130.
3. Родионов В.А., Солодова Н.О. Моделирование рельефной матрицы для получения оттиска на тонколистовом материале в программе SolidWorks // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. Самара, 2018. С. 112–115.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ НАНЕСЕНИИ НА КОРПУС АЛМАЗНОГО ДОЛОТА

Болдырева А.С., аспирант

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: nastena.boldyreva.99@mail.ru*

Рассматриваются твердосплавные материалы из карбида вольфрама при детонационном покрытии корпуса алмазного долота. Рассмотрены различные свойства этих материалов при разном их составе. На основании проведенного анализа с учетом характеристик поверхности (сцепляемость напыляемого материала, микротвердость и абразивная способность) определен материал ВК12 толщиной 200 мкм для нанесения на корпус шестилопастного долота PDC.

Ключевые слова: детонационное покрытие, напыление, твердосплавный материал, карбид вольфрама, корпус, алмазное долото, износостойкость, бурение, зубки, режцы PDC, адгезия, когезия, микротвердость

INVESTIGATION OF THE PHYSICAL, MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF DETONATION COATINGS WHEN APPLIED TO THE BODY OF A DIAMOND BIT

Boldyreva A.S., PhD student

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: nastena.boldyreva.99@mail.ru*

This article discusses carbide materials of tungsten carbide in the detonation coating of the diamond bit body. Various properties of these materials with their different composition are considered. Based on the above analysis, taking into account the surface characteristics (adhesion of the sprayed material, microhardness and abrasiveness), the VK12 material with a thickness of 200 microns was determined for application to the body of a six-bladed PDC chisel.

Keywords: detonation coating, spraying, carbide material, tungsten carbide, housing, diamond chisel, wear resistance, drilling, teeth, PDC cutters, adhesion, cohesion, microhardness

В настоящее время алмазные долота PDC находят все большее применение при бурении скважин для разведки и добычи полезных ископаемых. Это связано с тем, что алмазные долота позволяют повысить механическую скорость при бурении, улучшить управляемость и ускорить строительство скважины, что приводит к значительному экономическому эффекту.

Долота PDC все чаще работают в агрессивных средах и при больших нагрузках, что приводит к выпадению зубков и поломке корпуса. В литературе [1, 6] показано, что для увеличения износостойкости и прочности закрепления зубков необходимо применять твердосплавные покрытия, которые можно наносить на корпус долота различными методами. Эффективность применения твердосплавного покрытия зависит от его сцепляемости с поверхностью корпуса, износостойкости, твердости, толщины слоя покрытия и др. факторов.

В долотостроении при изготовлении алмазных долот PDC используются алмазные вставки, которые фиксируются на корпусе долота с помощью припоя, а затем армируются твердосплавной наплавкой. Наплавка твердого сплава осуществляется вручную, толщина покрытия – 2–3 мм, поэтому сам технологический процесс протекает с большими затратами материала и с малой производительностью. Например, в конструкции шестилопастного долота PDC 220,7 PE 613DS1-X04 на активном калибре используется зубок Г2652, который состоит из сплава ВК8-ВК ГОСТ 880-75 (рис. 1).

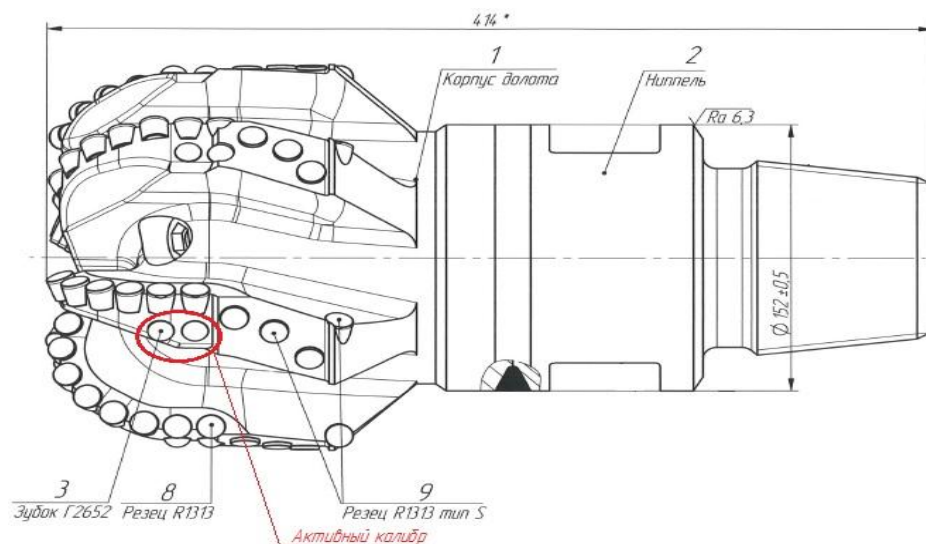


Рис. 1. Общий вид долота PDC 220,7 PE 613DS1-X04

В работе предложено вместо наплавки применить технологию нанесения твердосплавного покрытия на корпуса алмазных долот. Правильный выбор материала твердого сплава обеспечит повышение износостойкости алмазного долота.

Для нанесения покрытия детонационным способом рассматривались твердосплавные материалы с различными физико-механическими свойствами [1].

В табл. 1 приведен состав покрытий, которые применяются при детонационном методе.

Таблица 1

Материалы для детонационного покрытия

Производитель	Состав, %	Размер частиц, мкм
BK12 (USA)	88 % WC + 12 % Co	От 5 до 45
BK8 (Germany)	88 % WC + 8 % Co	От 20 до 50
BK5 (Russia)	88 % WC + 5 % Co	< 50

В табл. 2 приведены физико-механические свойства принятых к анализу материалов.

Таблица 2

Физико-механические свойства покрытий

Покрытие	Адгезия, МПа	Когезия, МПа	Микротвердость, МПа
BK8	129±24	199±28	8562±154
BK12	257±35	200±30	10114±249
BK 5	197±41	199±35	7317±113

В табл. 3 приведены эксплуатационные характеристики покрытий.

Таблица 3

Эксплуатационные характеристики покрытий

Покрытие	Износ, мм ³	Коэффициент трения	
		сухое	со смазкой
BK8	0,91±0,2	0,16±0,03	0,09±0,01
BK12	0,59±0,14	0,12±0,02	0,07±0,01
BK5	0,97±0,21	0,22±0,04	0,13±0,02

В табл. 4 приведены виды износа покрытий.

Таблица 4

Виды износа покрытия

Покрытие	Абразивное, мм ³	Эрозионное, мм ³
ВК8	0,92±0,15	0,28±0,03
ВК12	0,65±0,12	0,23±0,02
ВК 5	1,97±0,4	0,31±0,03

Анализ результатов показал, что наилучшие характеристики имеют твердые сплавы типа ВК12. Поэтому для дальнейших испытаний выбрано покрытие из ВК12.

На рис. 2 показан характер сцепления покрытия из ВК12 с поверхностью корпуса долота [1] (при увеличении x200).

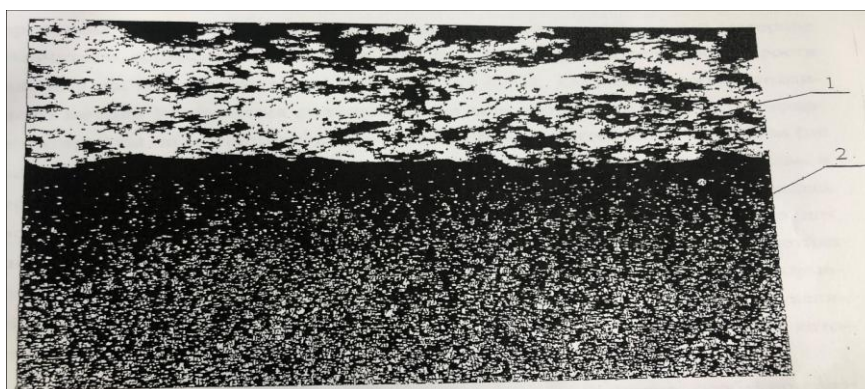


Рис. 2. Образец с покрытием из ВК12 × 100:

1 – материал покрытия толщиной 200 мкм;
2 – материал корпуса долота (сталь 40ХН2МА ГОСТ 4543-2016)

Выводы

1. Сплав ВК 12 больше всего подходит для наплавки корпуса долота детонационным методом.

2. Для достижения износостойкости при необходимом обеспечении высокой адгезии, когезии, микротвердости и низкой изнашиваемости необходимая толщина детонационного покрытия на корпус долота составляет 200 мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кремлёв В.И. Повышение долговечности буровых шарошечных долот на основе совершенствования технологии сборки и упрочнения шарошек с твердосплавными зубками: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. ... канд. техн. наук. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. 175 с.

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
В КОНТАКТЕ РОЛИКА И ВНУТРЕННЕЙ ДОРОЖКИ КАЧЕНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РОЛИКОПОДШИПНИКА**

Бразжникова А.М., старший преподаватель, аспирант

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: brazhnikova_98@mail.ru*

На работоспособность цилиндрических роликовых подшипников существенное влияние оказывают условия контакта цилиндрических поверхностей ролика и внутренней дорожки качения. Контактные силы между цилиндрическими поверхностями роликов и дорожек качения значительно больше всех других контактных сил в подшипнике. Полученные в результате конечно-элементных расчетов поля контактных давлений позволили рассчитать износ и определить его влияние на профиль ролика.

Ключевые слова: цилиндрический роликовый подшипник, модель напряженно-деформированного состояния, контактное взаимодействие, контактная сила, конечно-элементное моделирование

**FINITE ELEMENT MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE
IN THE CONTACT OF THE ROLLER AND THE INNER RACEWAY
OF A CYLINDRICAL ROLLER BEARING**

Brazhnikova A.M., senior lecturer, PhD student

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: brazhnikova_98@mail.ru*

The operational performance of cylindrical roller bearings is significantly influenced by the contact conditions between the cylindrical surfaces of the roller and the inner raceway. Contact forces between the cylindrical surfaces of the rollers and the raceways are considerably greater than any other contact forces in the bearing. The contact pressure fields obtained from finite element analysis allowed for the calculation of wear and determination of its influence on the roller profile.

Keywords: cylindrical roller bearing, stress-strain state model, contact interaction, contact force, finite element modeling

Изменения размеров и формы поверхностей подшипников качения под нагрузкой могут значительно корректировать кинематику их деталей и условия образования масляной пленки, а также оказывать существенное влияние на микроструктуру поверхностных слоев материала деталей [1, 2]. Эти факторы значительно влияют на долговечность подшипников [3], нарушая их работоспособность, а потенциальная цепная реакция может привести к еще более серьезным отказам [4].

Контактные силы между цилиндрическими поверхностями роликов и дорожек качения значительно больше всех других контактных сил в подшипнике. В рассматриваемой подшипниковой опоре между этими поверхностями реализуется лишь небольшая скорость скольжения.

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния контактирующих поверхностей ролика и внутренней дорожки качения.

Разработанная конечно-элементная модель включает в себя сектор внутреннего кольца и четверть ролика. На соответствующих поверхностях сечений задавались условия симметрии. Средний размер элемента в области контакта 0,03 мм, в остальной части модели – 1 мм (рис. 1); общее число элементов SOLID186 – 365453. Уменьшение разме-

ров элементов в зоне контакта не приводило к сколько-нибудь заметному уточнению поля контактного давления.

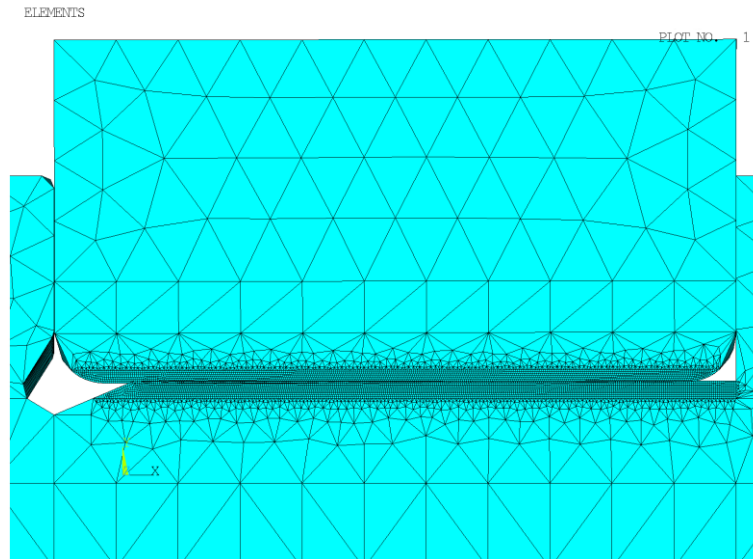


Рис. 1. Конечно-элементная сетка в месте контакта ролика и дорожки качения

На рис. 2 в качестве примера приводится поле контактного давления при нормальной контактной силе 563,19 Н. Это значение эквивалентной силы для расчета износа по усредненным параметрам. На этом же рисунке показаны линии, по которым рассчитывался износ.

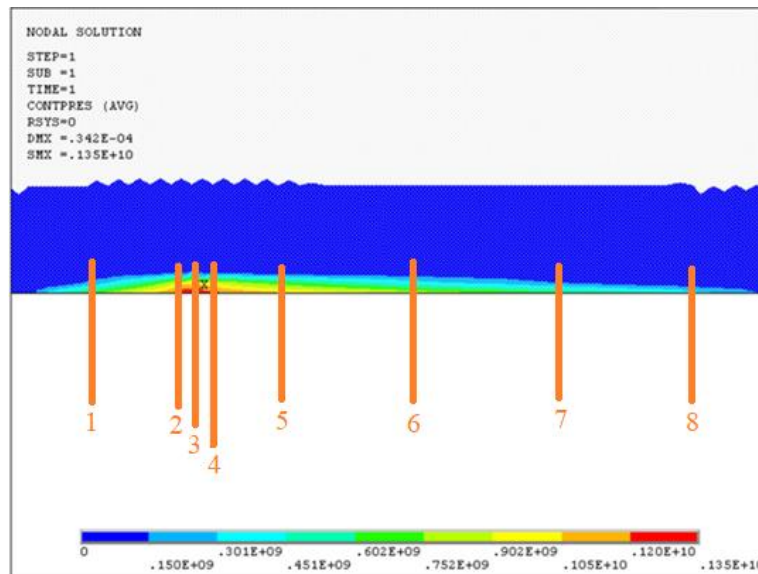


Рис. 2. Поле контактного давления (Па) в контакте дорожки качения внутреннего кольца и ролика при нормальной силе 563,19 Н. Цифрами обозначены номера линий износа

Линии износа, указанные на рис. 2, проходят по окружностям на поверхностях ролика и дорожки качения. В расчетах скоростей износа ролика и дорожки качения учитывались отношения ширины пятна контакта на соответствующей линии износа к длинам этих окружностей. Скорость качения в контакте «ролик – дорожка качения» составляет 36,7 м/с; скорость скольжения, возникающего во время действия контактных сил, – 0,02 м/с. Параметр масляной пленки $\Lambda = 0,62$, этому параметру соответствует коэффициент износа $3,57 \cdot 10^{-10}$.

Расчет скорости износа в контакте дорожки качения внутреннего кольца и ролика выполнен для следующих вариантов расчета: рабочий радиальный зазор 0,044 мм, размеры окон сепаратора 11,25 мм и температуре масла 100 °С.

Поскольку большой перекося может возникнуть только на короткое время, для оценки глубины износа за срок службы подшипника в 25000 часов используем варианты, в которых перекося колец длится 4 минуты. Наибольшая по длине контактной области глубина износа роликов за 25000 часов укладывается в диапазон 0,9–1,8 мкм. Для дорожки качения внутреннего кольца такой диапазон составляет 1,3–2,2 мкм. К этим величинам надо добавить износ при кратковременных больших перекосях.

Наиболее значительный износ наблюдается в месте, где заканчивается цилиндрический участок профиля ролика. Он соответствует увеличению рабочего радиального износа на 11,6 мкм. Распределение глубины износа по дорожке качения за 25000 часов иллюстрируется на рис. 3.



Рис. 3. Распределение глубины износа внутренней дорожки качения за 25000 часов эксплуатации

Такой же характер износа наблюдается и в других вариантах расчета. Кроме того, максимальный износ ролика также наблюдается в месте перехода от цилиндрического участка к коническому.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Щец С.П., Сакало В.И. Влияние смазочного материала на процессы, протекающие в подшипниках качения // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. Т. 50. № 2. С. 31–35.
2. Jiang S., Wang T., Xiao L. Experiment research and dynamic behavior analysis of multi-link mechanism with wearing clearance joint // Nonlinear Dynamics. 2022. Vol. 109. No. 3. Pp. 1325–1340.
3. Балякин В.Б., Жильников Е.П., Пилла К.К. Методика расчета долговечности подшипников с учетом износа тел качения // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 4. С. 491–497.
4. Tan D., Li R., He Q., Yang X., Zhou C., Mo J. Failure analysis of the joint bearing of the main rotor of the Robinson R44 helicopter: A case study // Wear. 2021. V. 477.

УДК 621.01

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АВТОНОМНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ «ПЛАНАР 4ДМ2»

Воронецкий Н.М., студент

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: voronetskiy.02@mail.ru*

Рассматривается обоснование значимости применения автономных подогревателей, конструкция радиатора теплообменника автономного подогревателя самарской фирмы ООО «Адверс». Выявлены недостатки формы, габаритов радиатора и влияние их установки на транспортное средство. Приведена измененная конструкция радиатора и корпуса подогревателя.

Ключевые слова: автономные подогреватели, габариты конструкции, применение 3D-моделирования, удобство установки

OPTIMIZING THE DESIGN OF THE AUTONOMOUS HEATER “PLANAR 4DM2”

Voronetskiy N.M., student

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: voronetskiy.02@mail.ru*

Justification of the significance of the application of autonomous heaters, the design of the radiator of the heat exchanger of the autonomous heater of the Samara company “Advers” LLC is considered. The drawbacks of the shape, dimensions of the radiator and their influence of installation on the vehicle are revealed. The redesigned construction of radiator and heater body is given.

Keywords: autonomous heaters, design dimensions, 3D modeling, convenience of installation

При эксплуатации транспортного средства в зимнее время года возникает вопрос о предпусковом подогреве двигателя и обогреве салона. Особенно этот вопрос актуален в климатических условиях нашей страны, так, например, ночью 3 января 2016 года в 30-градусный мороз на трассе Оренбург – Орск снежным бураном в десятках автомобилей оказались заблокированы 84 человека. Фактически без спецсредств были спасены или спаслись сами 83. Один человек погиб, 12 получили тяжелые обморожения. Этой трагедии можно было избежать, если бы в части автомобилей были установлены автономные подогреватели.

Все стандартные автомобильные устройства в той или иной степени зависят от работы двигателя. Например, обогреватели салона, обогреватели сидений, обогреватели ветрового и заднего стекла. Для решения этого вопроса владельцы транспортных средств устанавливают автономные подогреватели двигателя. Они потребляют меньше топлива (0,14–0,26 л/ч) и требуют меньшего заряда аккумулятора, чем автомобильный двигатель. Кроме того, обогреватели оснащены датчиком заряда батареи. На сегодняшний день на рынке представлены подогреватели нескольких фирм. Отечественные: самарская фирма ООО «Адверс». Зарубежные: Eberspacher – Германия, Webasto – Германия. При выборе подогревателя помимо характеристик важную роль играют его габаритные размеры, так как в современных автомобилях очень мало места в подкапотном пространстве (рис. 1).

Для анализа был взят подогреватель самарской фирмы ООО «Адверс», модель «Планар 4ДМ2» (рис. 2). Ключевым элементом подогревателя является теплообменник. При сгорании топлива образуются разогретые газы [1], которые, перемещаясь в выхлопную трубу, по пути перемещения нагревают стенки теплообменника, от стенок теплообменника нагреваются радиаторы [2].

Нагретые радиаторы охлаждаются воздухом, который может подаваться как из помещения (например, кабины магистрального тягача), так и снаружи помещения. Так как

теплообменник с радиатором является основной частью подогревателя в корпусе, он занимает больше всего места. Во всех подогревателях корпус повторяет форму радиатора, что влияет на габаритные размеры (рис. 3) и удобство установки.



Рис. 1. Пример подкапотного пространства современного автомобиля



Рис. 2. Автономный подогреватель «Планар 4ДМ2»

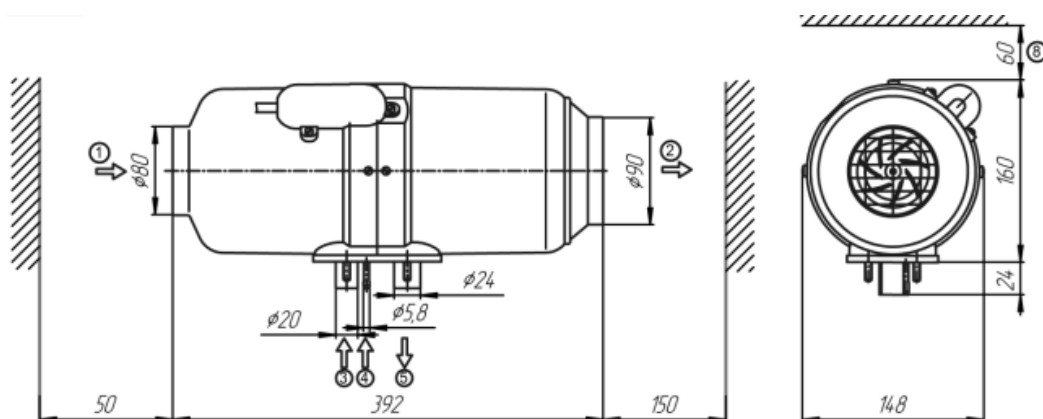


Рис. 3. Габаритные размеры подогревателя «Планар 4ДМ2»

Проанализировав форму и размеры радиатора автономного подогревателя «Планар 4ДМ2», можно отметить следующее. Его установка в большинство современных автомобилей вызывает трудности, так как корпус такой формы трудно разместить в подкапотном пространстве. С учетом недостатков конструкции корпуса и радиатора теплообменника были разработаны 3D-модели улучшенной формы и габаритов (рис. 4, 5, 6).

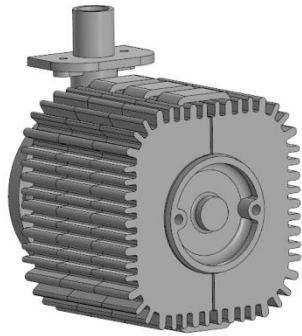


Рис. 4. Модель измененного радиатора теплообменника

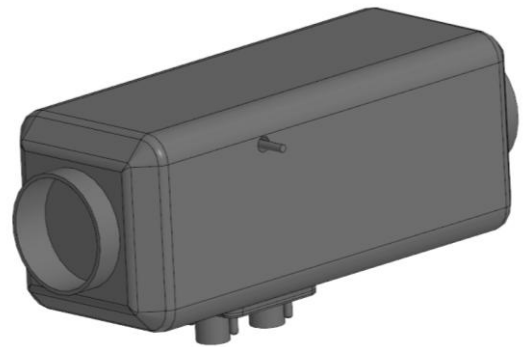


Рис. 5. Модель измененного корпуса подогревателя

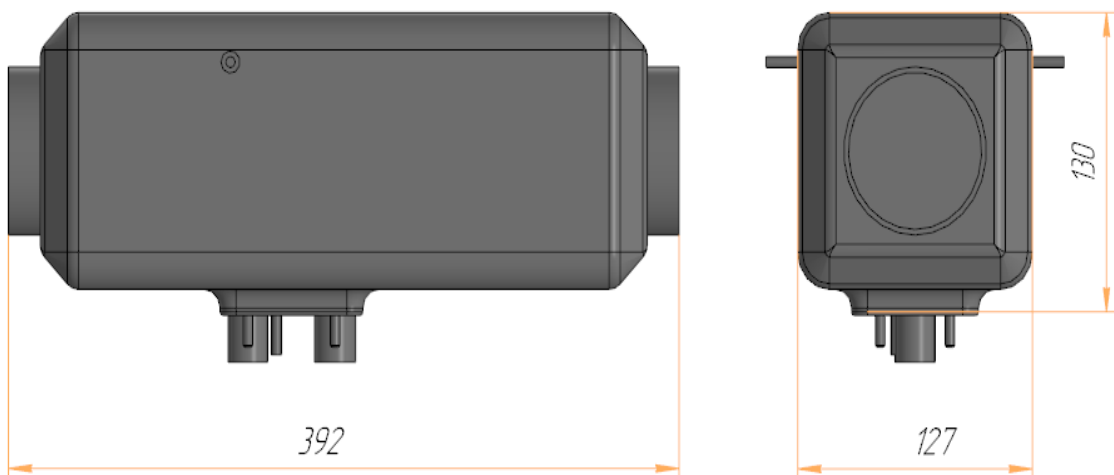


Рис. 6. Габаритные размеры измененного подогревателя

Пассажирские автомобили, оснащенные автономными подогревателями, позволяют экономить топливо и, как следствие, улучшают экологию. Используя новейшие цифровые технологии, производители подогревателей постоянно совершенствуют конструкцию своих подогревателей [3] и способ соединения отопителя со штатными агрегатами автомобиля. Использование 3D-моделирования позволяет компактно установить отопитель в автомобиле, что в условиях малого свободного пространства является актуальным. В подкапотном пространстве автомобиля все агрегаты выполнены в форме параллелепипеда, следовательно, овальная форма затрудняет установку подогревателя. Корпус в виде параллелепипеда при той же толщине стенок обладает существенно большей механической прочностью по сравнению с корпусом цилиндрической формы.

Таким, образом стандартная овальная форма корпуса и радиатора подогревателя «Планар 4ДМ2» является менее пригодной к установке и использованию, чем скругленный параллелепипед.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Носов Н.В., Родионов В.А. Конструкция и принцип работы теплообменника отопителя «Планар 4Д–24»: метод. указ. к лаб. работе. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 27 с.
2. Родионов В.А., Родионова О.В., Ахметов Е.Ю. Разработка конструкции теплообменника воздушного отопителя // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Высокие технологии в машиностроении». Самара, 2013. С. 55–58.
3. Родионов В.А., Солодова Н.О. Оптимизация конструкции радиатора автомобильного воздушного отопителя // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 20. № 4 (2). Самара, 2018. С. 293–296.

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ФОРМЫ СТАЛЬНЫХ ПОКОВОК И ИЗНОСОСТОЙКОЙ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ


Галкин В.И. , профессор, д.т.н., профессор, **Преображенский Е.В.**, доцент, к.т.н., доцент, **Маркелов Е.Е.**, аспирант

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: galkinvi1801@yandex.ru*

Представлены результаты исследования современных возможностей систем автоматизированного проектирования по разработке штамповой оснастки и геометрии поковок. Предложен и реализован в виде программного обеспечения алгоритм для подбора формы ручьев штампа по чертежу чистой детали. Показана перспективность использования предложенного решения на металлургических и машиностроительных предприятиях для ускорения процесса проектирования поковок, а также для подготовки обучающего набора данных в будущих нейронных сетях.

Ключевые слова: форма поковки, проектирование штампов, нейронные сети, САПР, QForm, SolidWorks

NEW DIRECTIONS IN DESIGNING THE SHAPE OF STEEL FORGINGS AND WEAR-RESISTANT DIES

Galkin V.I. , Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Preobrazhenskii E.V.**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Markelov E.E.**, PhD student

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation
E-mail: galkinvi1801@yandex.ru*

The results of the study of the modern capabilities of CAD systems for the development of forging dies and the geometry of steel forgings are presented. An algorithm for selecting the shape of die cavity based on the drawing of the finished part has been proposed and implemented as software. The potential of using this solution at metallurgical and engineering plants to accelerate the forging design process and to prepare a training set for future neural networks has been demonstrated.

Keywords: forging shape, die design, artificial neural network, CAD, QForm, SolidWorks

Горячая объемная штамповка является одним из востребованных способов обработки металлов давлением, позволяющим с высокой производительностью получать изделия различной формы. С наметившимся ростом промышленных предприятий и заказов по изготовлению деталей появляется новая актуальная задача: ускорить процесс проектирования штамповой оснастки. При этом уже на этапе технологической подготовки производства необходимо соотнести эксплуатационные свойства разрабатываемых штампов и геометрию поковки, т. е. оценить износостойкость оснастки, коэффициент использования материала и прочие параметры. Поэтому большое значение имеет применение систем автоматизированного проектирования и программ для моделирования технологических процессов. Кроме того, перечисленные средства могут быть дополнены искусственными нейронными сетями, которые в последние годы демонстрируют значительный прогресс [1].

На российском рынке представлено достаточное число программных комплексов для автоматизации проектирования: SolidWorks, Siemens NX, TFlex-CAD, КОМПАС-3D и др. Однако функциональность указанных приложений, хотя и позволяет удобно проектировать штамповую оснастку, не содержит специализированных инструментов для создания ручьев штампов. Во многом это связано с тем, что разработка технологического процесса подразумевает знание особенностей течения металла и назначение соответствующих напусков

на основе опыта и проверочного моделирования. К тому же добавление припусков на механическую обработку элементов детали, задание штамповочных уклонов и радиусов закруглений определяется не только ГОСТ 7505-89, но и точностью имеющегося оборудования, требованиями заказчика, серийностью производства. Однако автоматизация построения геометрии поковки или гравюры штампов позволила бы технологю существенно сократить время на разработку, поэтому по данному направлению ведутся несколько исследований. В том числе на основе подключения дополнений к существующим системам проектирования или с использованием нейронных сетей. Так, одним из возможных вариантов автоматизации создания штамповой оснастки является QFormDirect – приложение, позволяющее на основе результатов моделирования методом конечных элементов выявлять места повышенного износа штампов и подбирать геометрию промежуточных переходов штамповки [2]. Благодаря интеграции с расчетной программой QForm авторы продемонстрировали, что обеспечивается формирование поволок без поверхностных и внутренних дефектов, а ручей штампов легко получается обычным вычитанием твердых тел.

Другой пример – попытка обучить нейронные сети для проектирования формы поволок [3, 4]. Для предсказания наиболее подходящей геометрии штампового ручья рассматривалось несколько моделей нейронных сетей, включая те, которые имели сверточные слои, а значит, потенциально могли выделить отличительные признаки исходной детали. В результате подтверждено, что на основе имеющихся опытных данных удастся найти достаточно точную корреляцию между формой поковки и профилем штампа. Но для обучения нейронных сетей необходим большой набор исходных примеров, которые есть далеко не у каждого предприятия, занимающегося горячей объемной штамповкой. Следовательно, появляется потребность в новом программном продукте для автоматизированного проектирования штамповой оснастки и формы поволок.

Для решения данного вопроса предлагается рассмотреть алгоритм по формированию геометрии поволок из чертежа чистой детали (рис. 1).

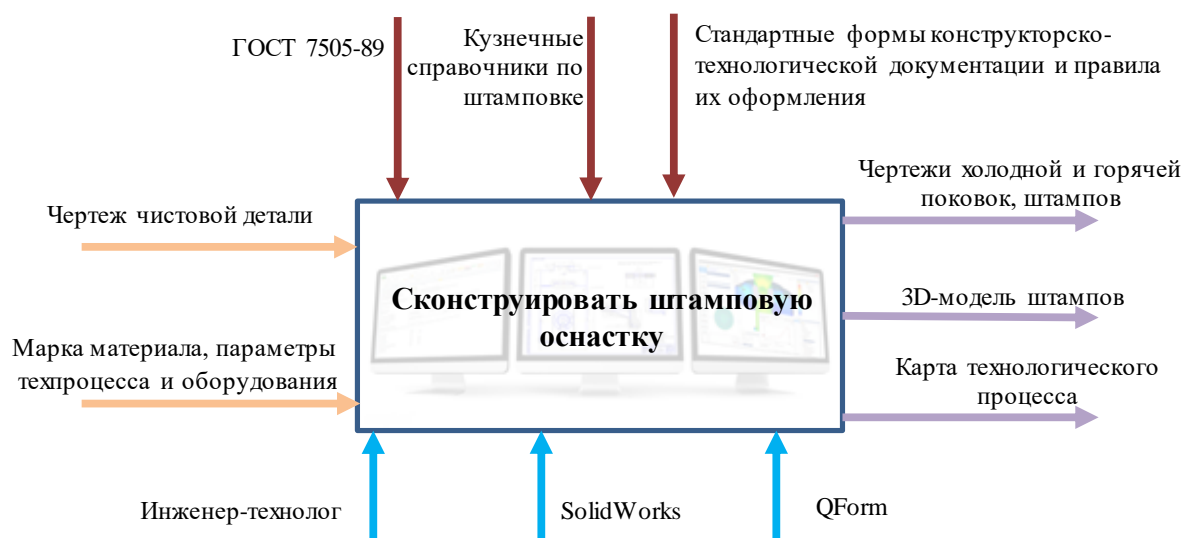


Рис. 1. Функциональная модель предлагаемого приложения

На вход приложения подается подготовленный чертеж чистой детали (для осесимметричной 2D-задачи), а также основные параметры технологического процесса, включая выбранное для штамповки оборудование. Алгоритм анализирует и проверяет полученную геометрию, выделяет ключевые элементы, определяет исходные размеры, выполняет начальное упрощение. Затем, основываясь на государственном стандарте и справочной информации, автоматически назначаются допуски, припуски и кузнечные напуски.

Отметим, что инженер-технолог может вручную указать исходный индекс, т. е. при необходимости увеличить припуски на механическую обработку, а также задать положение

и тип облойной канавки и перемычки под прошивку отверстия при его наличии. Управляя радиусами скругления или штамповочными уклонами, можно достичь повышения коэффициента использования материала при одновременном сохранении корректности формы поковки.

Для проверки предложенной формы поковки предусмотрен экспорт штампов в программу моделирования QForm [5]. Поскольку ее современная версия содержит QForm API, возможен автоматический запуск и передача команд со считыванием результатов конечно-элементного анализа без непосредственного участия человека. Другими словами, обеспечивается итерационный подход, при котором происходит подбор эффективной формы поковки и ручья штампов с тем, чтобы в деформируемом металле отсутствовали дефекты и снижался износ оснастки.

После подтверждения работоспособности технологического процесса по результатам моделирования приложение позволяет создать трехмерную модель штамповой оснастки, например, в виде вставок для КГШП или универсальных блоков для молота (рис. 2).

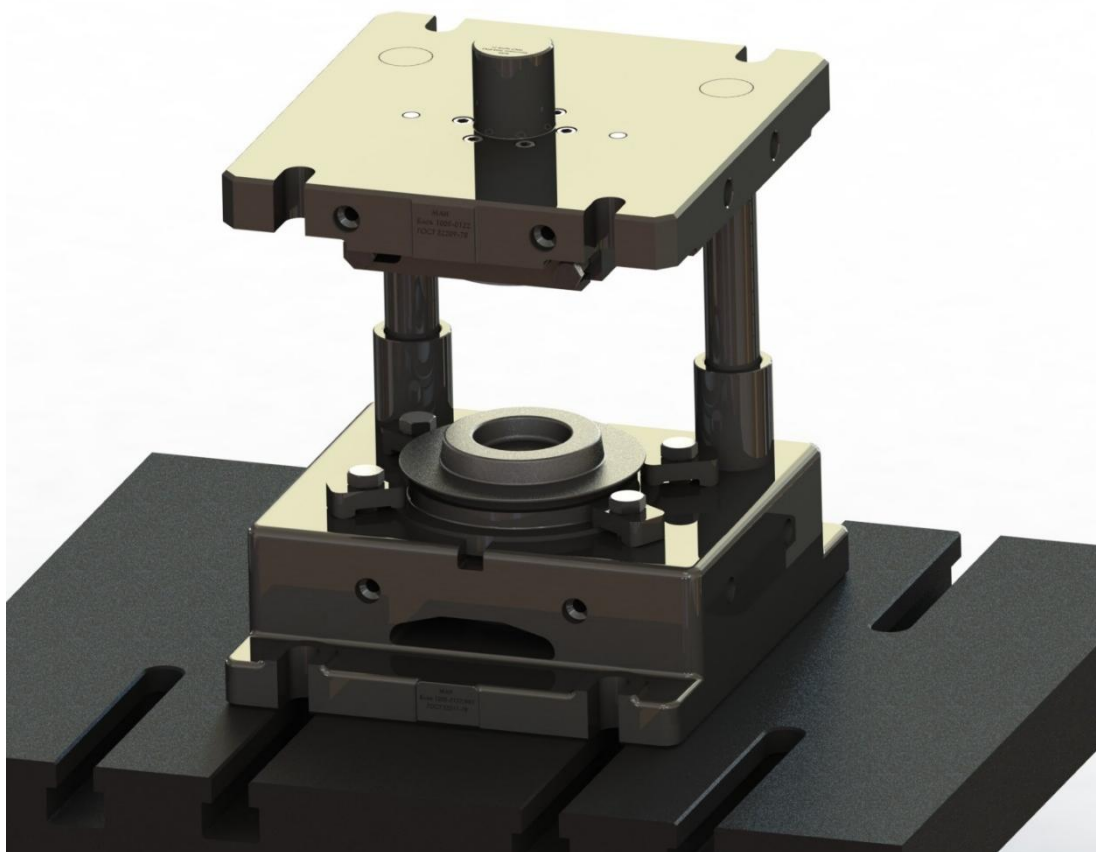


Рис. 2. Пример сформированной модели штампов

Полученная 3D-модель может быть использована для изготовления штампов на станках с ЧПУ. Основные крепления оснастки соответствуют стандартам, а размеры подбираются согласно выбранному инженером типу оборудования.

Кроме того, приложение позволяет сформировать конструкторскую и технологическую документацию. Сохраняются чертежи холодной и горячей поковки, сборочный чертеж штамповой оснастки, маршрутная карта. В операционной карте заполняются параметры переходов, приводится расчет коэффициента использования материала, печатаются подобранные размеры заготовки. Стоит отметить, что на настоящий момент времени приложение обрабатывает осесимметричные детали, а в качестве промежуточного перехода рассматривается только осадка с дополнительной формовкой. Данные ограничения являются следствием возникающих трудностей при необходимости компьютерного выбора промежуточных форм штампуемых полуфабрикатов.

В приложении также предусмотрено автоматическое создание возможной исходной геометрии деталей. Эта функция позволяет быстро сгенерировать обучающий набор данных для нейронных сетей. Запланирован вывод геометрии штампов не только в виде параметрических моделей, но и в виде изображений, поскольку на текущий момент времени сверточные сети демонстрируют высокую эффективность обработки данного формата.

Таким образом, современные предприятия, занимающиеся изготовлением деталей с помощью горячей объемной штамповки, могут выбрать несколько направлений для ускорения проектирования формы поковок и штамповой оснастки. Ставший традиционным подход с использованием САПР и компьютерного моделирования, хотя и демонстрирует качественные результаты, но требует высокой квалификации сотрудников и продолжительного времени обработки данных. Увеличение скорости проектирования возможно с применением специализированных приложений, предназначенных для учета конкретных задач, возникающих перед инженером-технологом при разработке технологического процесса обработки металлов давлением. Так, представленное приложение уже сейчас позволяет сократить время проектирования штамповой оснастки до нескольких секунд. А встроенная функциональность по генерированию геометрии исходных деталей является полезным дополнением для обучения будущих нейронных сетей. Фактически, как показывают доступные зарубежные и отечественные источники, потенциал искусственного интеллекта в ближайшие годы с высокой вероятностью приведет к замене трудоемкой работы инженера-технолога использованием нейронных сетей как минимум в области проектирования штампов для относительно простых деталей, а позже, возможно, и для нестандартных изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Artificial Intelligence in the Age of Neural Networks and Brain Computing / R. Kozma, C. Alippi, Y. Choe and F.C. Morabito // 2nd edition, Elsevier Science, 2023. 400 p.
2. Closed die Forging Preform Shape Design Using Isothermal Surfaces Method / N. Biba, A. Vlasov, D. Krivenko, A. Duzhev, S. Stebunov // Procedia Manufacturing. Vol. 47. 2020. Pp. 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.219>
3. Application of neural networks in complex forging die design / L.J. Cheng, G.Q. Zhao, J.N. Cheng and X.H. Zhao // Int. J. Materials and Product Technology. Vol. 38. Nos. 2/3. 2010. Pp. 237–247. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2010.032102>
4. A New Approach to Preform Design in Metal Forging Processes Based on the Convolution Neural Network / S. Lee, L. Quagliato, D. Park, I. Kwon, J. Sun, N. Kim // Applied Sciences. 2021; 11(17):7948. <https://doi.org/10.3390/app11177948>
5. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учеб. пособие / А.В. Власов и др.; под ред. А.В. Власова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 383 с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПРИНТЕРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Горобец И.А., доцент, к.т.н., доцент, **Киселица Д.О.**, аспирант, **Жарких Д.С.**, аспирант

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация, ДНР
E-mail: igor.gorobets2022@yandex.ru

Приведены структурная и кинематическая схемы 3D-принтера с избыточными степенями свободы рабочего органа. Разработана 3D-модель модернизированного принтера. Проведены исследования объема печати модернизированного принтера. Исследованы динамические характеристики модернизированного устройства. Представлен анализ динамических характеристик конструкции принтера. Доказано повышение эффективности эксплуатации 3D-принтеров с разработанной конструкцией.

Ключевые слова: принтер, объем, печать, структура, компоновка, динамика, эффективность

DESIGN AND MODELING OF PARAMETERS OF A PARALLEL STRUCTURE OF 3D PRINTER

Gorobets I.A., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Kiselitsa D.O.**, PhD student, **Zharkikh D.S.**, PhD student

Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, Russian Federation
E-mail: igor.gorobets2022@yandex.ru

A structural and kinematic scheme of a 3D printer with additional excess degrees of freedom of the working body is proposed. Synthesized 3D model of the upgraded printer. The values of the printer print volume before and after the upgrade have been studied. The dynamic characteristics of the upgraded device are investigated. An analysis of the dynamic characteristics of the printer design is given. The proposed schemes and the developed device design will increase the efficiency of 3D printer operation.

Keywords: printer, volume, printing, structure, layout, dynamics, efficiency

Совершенствование производства изделий машиностроения привело к появлению и реализации аддитивных технологий (англ. Additive Fabrication), состоящих в послойном увеличении размеров объекта производства [1, 2, 3]. В настоящее время существует много разновидностей аддитивных технологий, недостатками которых являются невысокие показатели прочности и качества поверхностного слоя (точность, шероховатость, твердость) в сравнении с классическими технологиями получения изделия машиностроения (subtractive manufacturing technologies, технологии вычитания материала, когда деталь получается с размерами меньше размеров заготовки). Однако достоинствами аддитивных технологий является низкая себестоимость изготовления изделия, минимальные производственная площадь и технический персонал, невысокая стоимость технологического оборудования. В настоящее время интерес представляет FDM-технология печати изделия из нити – гибкого филамента, обладающего различными механическими характеристиками [1, 2, 3, 4]. Важной особенностью аддитивных технологий является их исключительная работа с предварительно спроектированной в САПР 3D-моделью изделия.

Реализация аддитивных технологий осуществляется устройствами 3D-печати, которые имеют разнообразные варианты конструкций, однако реализуют картезианский или полярный принципы печати (в зависимости от движения экструдера), а также могут иметь и принцип параллельной структуры (Delta-принтер) (рис. 1). Общим недостатком известных конструкций является ограниченный объем печати по сравнению с объемом технологического

устройства. Это связано с тем, что объем печатной фигуры, которая реализуется движением рабочего органа, всегда меньше объема устройства. Причем такое уменьшение рабочего объема в принтере может достигать величины 40 %.



Рис. 1. Вид конструктивных реализаций 3D-принтеров для работы в декартовой, полярной системах координат и на основе параллельных структур соответственно

Именно поэтому вопрос увеличения объема производимого изделия машиностроения на 3D-принтерах с применением FDM-технологий является в настоящее время актуальным для проведения исследований и научно-технических разработок.

В качестве объекта моделирования использовался 3D-принтер параллельной структуры [5, 6, 7], обладающий рядом преимуществ в скорости и точности печати. При проектировании 3D-конструкции принтера была принята структурная схема в виде Триглайда. Авторами было предложено дополнить конструкцию устройства 3D-печати избыточной степенью свободы рабочего органа путем введения дополнительного звена в виде диска 8 (рис. 2) с рабочим органом 9, установленного на подвижной платформе 4 с возможностью поворота относительно вертикальной оси платформы. Причем рабочий орган 9 принтера располагается на поворотном диске 8 с эксцентриситетом относительно вертикальной оси платформы 4 (см. рис. 2). Такое расположение рабочего органа 9 и дополнительная степень подвижности в виде поворота диска 8 относительно вертикальной оси подвижной платформы 4 позволит увеличить максимальный объем печати 3D-принтера.

Для дальнейших исследований авторами была разработана кинематическая схема принтера, рис. 3, состоящая из электродвигателя 1, вертикальных направляющих 2 и 3, каретки 4, шкивов 5 и 6, ремня 7, элемента соединения 8 с кареткой 4, штанг 9 и 10 с шаровыми опорами 11–14, подвижной платформы 15, поворотного диска 16, зубчатого колеса 17, электродвигателя 18 с шестерней 19, п-образной рамы 20, электродвигателя 21, шестерни 22, зубчатых колес 23 и 24, экструдера 25, опор 26 и 27 экструдера, вала 28.

Реализация синтеза и последующего 3D-моделирования работы устройства потребовало выбора материала и габаритов деталей, расчетов прочности основных узлов принтера, которые были проведены в САЕ приложении FEM SolidWorks.

В качестве движителя элементов принтера был принят электрический привод в виде шаговых двигателей. Для выбора механических характеристик электрических двигателей привода была разработана расчетная схема (рис. 4) и определены параметры крутящего момента и мощности электродвигателей. По результатам расчета механических характеристик в качестве привода движущихся кареток 3D-принтера приняты шаговые двигатели модели Nema 17 17HS3430 (рис. 5).

В результате выбора геометрических параметров деталей и узлов принтера в САПР КОМПАС-3D построена 3D-модель, позволяющая провести теоретические исследования

и определить максимальный объем печати изделий на устройстве до и после его модернизации путем добавления избыточной степени свободы рабочего органа.

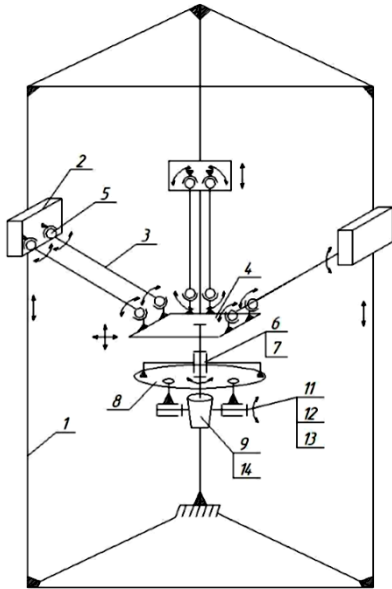


Рис. 2. Структурная схема принтера с улучшенными параметрами объема печати

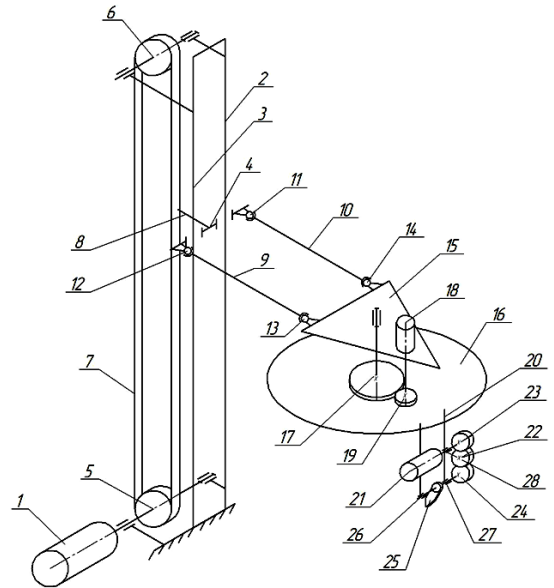


Рис. 3. Фрагмент кинематической схемы принтера

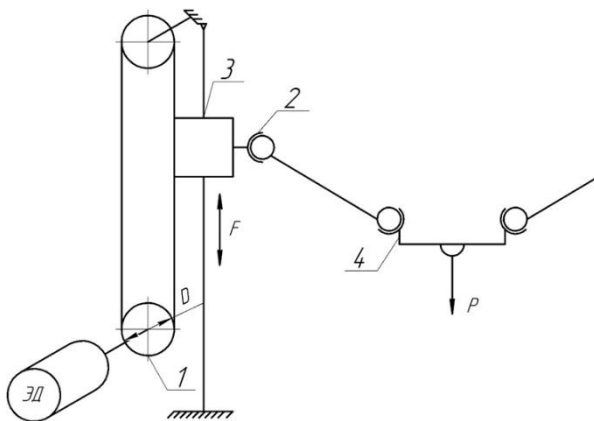


Рис. 4. Расчетная схема для определения параметров привода принтера:
1 – шкив; 2 – штанга с опорой;
3 – каретка; 4 – подвижная платформа

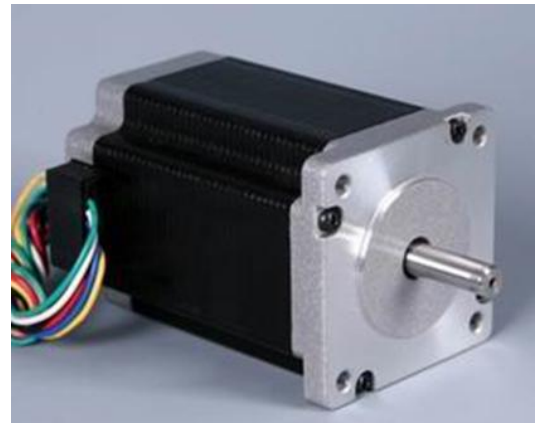


Рис. 5. Вид шагового электрического двигателя модели Nema 17

Анализ результатов объемных графических исследований 3D-печати принтеров (рис. 6), дает основание утверждать, что добавление избыточной степени свободы рабочего органа для принятых исходных данных позволит увеличить объем печати на 136 % (с $0,0452 \text{ м}^3$ до $0,107 \text{ м}^3$).

Реализация разработанных конструктивных решений для увеличения объема печати объектов машиностроения за счет введения избыточной степени свободы рабочего органа внесет и изменения динамических характеристик самого устройства печати. Для изучения динамических характеристик и параметров разработанной конструкции 3D-принтера были проведены теоретические исследования устройства в модуле APM FEM CAD системы КОМПАС-3D. По результатам исследований параметров устройства определены амплитудно-частотная

характеристика (АЧХ) конструкции 3D-принтера, рис. 7, и гармоник частот собственных колебаний изделия. Из графика АЧХ следует, что наибольшие амплитуды колебаний наблюдаются у низкочастотных гармоник (частота колебаний порядка 10,9 Гц), однако, присутствует и высокочастотная гармоника с частотой, равной 178,3 Гц.

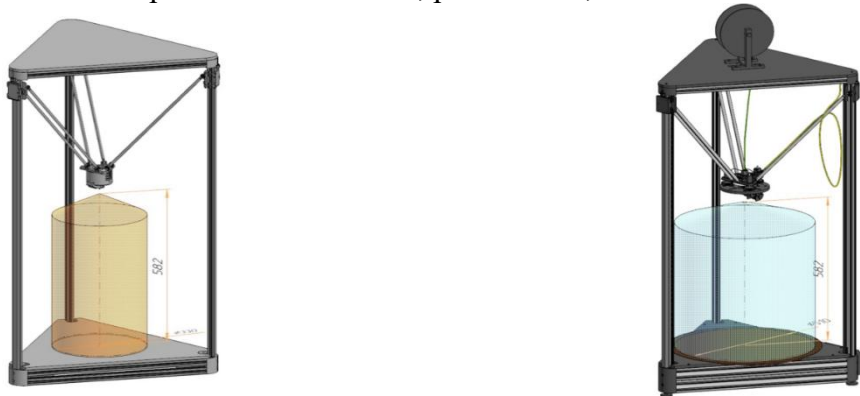


Рис. 6. 3D-модель рабочей зоны принтера до и после модернизации, соответственно

Результаты моделирования динамических параметров механической системы модернизированной конструкции принтера позволят учесть при программировании движений рабочего органа 3D-принтера параметры скорости, ускорений и подачи филамента, которые бы исключали возможное вхождение устройства в предрезонансную фазу работы, вызывающую многократное увеличение амплитуды колебаний рабочего органа принтера.

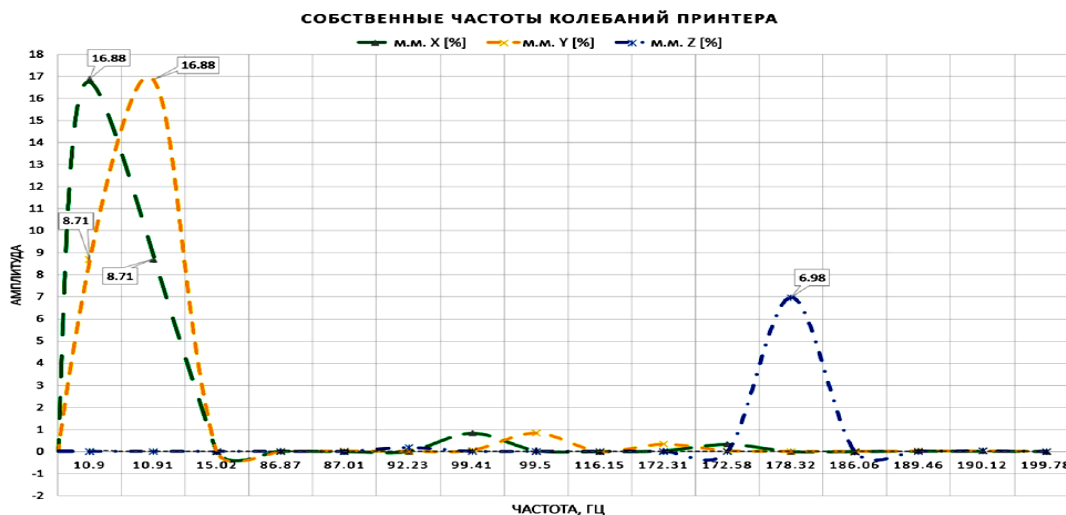


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика конструкции 3D-принтера

С целью увеличения объема производимого изделия машиностроения на 3D-принтерах FDM-технологий разработаны структурная и кинематическая схемы устройства с дополнительными избыточными степенями свободы рабочего органа. Рассчитаны геометрические параметры деталей и узлов, синтезирована 3D-модель модернизированного принтера. Исследованы параметры увеличения объема печати принтера за счет добавления избыточной степени свободы рабочего органа. Доказано увеличение на 136 % объема печати при использовании конструкции 3D-принтера с дополнительными избыточными степенями свободы рабочего органа.

Исследованы динамические характеристики модернизированного устройства. Анализ динамических характеристик разработанной конструкции принтера показал наличие низкочастотных (10,8 Гц) и высокочастотных (178,3 Гц) гармоник спектра частот собственных колебаний устройства с преимуществом (более 2,4 раза) амплитуды по низкой частоте.

Разработанные структурная, кинематическая схемы и конструкция устройства могут использоваться на стадии проектирования новых и модернизации существующих конструкций промышленных 3D-принтеров, что повысит объем печати и эффективность эксплуатации устройств реализации аддитивных технологий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
2. Louvis E., Fox P., Sutcliffe C.J. Selective laser melting of aluminum components // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211. Pp. 275–284.
3. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding [et al.] // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015. Vol. 81. Pp. 465–481.
4. Горобец И.А., Голубов Н.В., Пикалов Д.А. Обзор исследований прочности изделий полученных с использованием FDM-технологий // *Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14–20 сентября 2020 г.* Донецк: ДонНТУ, 2020. С. 81–85.
5. Kong X., Gosselin C. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 272 p.
6. Хейло С.В., Глазунов В.А., Палочкин С.В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ: монография. М.: ФГБОУ ВПО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011. 153 с.
7. Исследование структурных схем конструкций 3D-принтера / И.А. Горобец, А.М. Лахин, Д.О. Киселица, Д.С. Жарких // *Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12–18 сентября 2022 г.* Донецк: ДонНТУ, 2022. С. 80–83.

РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ СУВЕНИРНОЙ ПРОДУКЦИИ

Горячева Д.Д., студент, Родионов В.А., ст. преподаватель

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: goryacheva.dasha.02@yandex.ru*

Разработана концепция создания нового изделия и его 3D-модель, проведен анализ рынка подставок и органайзеров, выявлены особенности разработки сувенирной продукции, выбрана программа для 3D-моделирования, определен материал для изготовления подставки, осуществлен рендеринг будущего сувенира, представлен способ изготовления «сувенира ФОН ВАКАНО».

Ключевые слова: сувенир, подставка, материал изготовления, модель, рендер

DEVELOPMENT OF A 3D MODEL OF SOUVENIR PRODUCTS

Goryacheva D.D., student, Rodionov V.A., senior lecturer

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: goryacheva.dasha.02@yandex.ru*

In the course of this work, the concept of creating a new product and its 3D model was developed, the market of stands and organizers was analyzed, the features of souvenir product development were revealed, a program for 3D modeling was selected, the material for making the stand was determined, the rendering of the future souvenir was carried out, the method of making the “VON WAKANO souvenir” was presented.

Keywords: souvenir, stand, material of manufacture, model, render

Часто для расположения предметов люди используют различные подставки и органайзеры, они помогают организовать пространство для комфортного размещения вещей, гаджетов, канцелярских принадлежностей, документов, украшений и других мелочей.

Главное преимущество органайзеров – правильное и удобное хранение предметов. У каждой вещи свое место, что значительно упрощает быт и предотвращает беспорядок, не нужно тратить время на поиски, все находится «под рукой». Более того, подставка может играть роль декоративного элемента, который будет привлекать внимание и украшать пространство за счет красивого или необычного внешнего вида [1].

На рынке представлено огромное количество винных столиков, полок для хранения вина, которые выглядят стильно и привлекательно.

Ни для кого не секрет, что в нашем городе Самаре находится известный Жигулевский пивоваренный завод, основанный Альфредом Филипповичем фон Вакано. У этого завода богатая история, которая берет свое начало в 1881 году.

Удивительно, что у такого крупного и успешного производства отсутствует фирменная линейка подставок для хранения бутылок.

В интернет-магазинах можно найти множество органайзеров для стеклянных бутылок объемом 0,5 литра, однако все они однотипны и выглядят как ящик с вырезами под дно и металлические контейнеры для «снеков».

Таким образом, было принято решение создать изделие, которое будет удобным в использовании и обладать привлекательным внешним видом, а также способствовать узнаваемости бренда «ФОН ВАКАНО».

При создании изделия необходимо проанализировать, где разместить вспомогательные предметы, в особенности открывашку, чтобы не тратить время на ее поиски в ящиках и на полках. К тому же неприятно наблюдать на столе разбросанные крышки, поэтому возникла идея создать отсек, куда можно было положить крышки на время застолья для дальнейшей

их утилизации. Подставка рассчитана на две бутылки. Также в основании имеется вырез для комфортного переноса подставки. Таким образом, получаем итоговый вариант модели «сувенир ФОН ВАКАНО» (рис. 1).

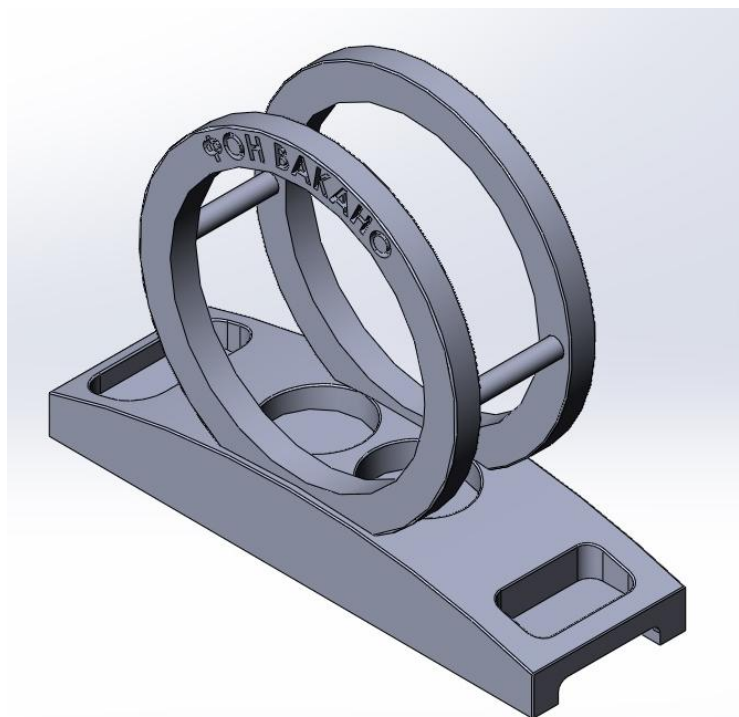


Рис. 1. Модель «сувенир ФОН ВАКАНО»

Для моделирования подставки выбрана программа SolidWorks, поскольку она удовлетворяет критериям для создания нашего изделия, таким как удобный пользовательский интерфейс, возможность работы с трехмерными моделями, реалистичная визуализация, наличие лицензии в СамГТУ [2]. Производим рендер модели с заданным материалом (рис. 2).



Рис. 2. Рендер модели «сувенир ФОН ВАКАНО»

Дальнейшая обработка изделия будет проводиться в программном обеспечении Siemens NX 9.

Материалом для изготовления органайзера выбран дубовый мебельный щит, так как его древесина имеет красивую текстуру, что позволяет создать уникальное изделие, которое будет вызывать интерес гостей. Также дуб обладает высокой прочностью и долговечностью [3]. Дерево отлично впишется в любой интерьер и поможет создать уютную атмосферу.

Таким образом, подставка не только поможет организовать пространство, но и будет стильным элементом декора.

Обработка органайзера «сувенир ФОН ВАКАНО» предполагается на фрезерно-гравировальном станке с ЧПУ. На мебельный щит наносится разметка, после чего детали вырезают, проверяют на наличие дефектов, далее фрезеруются углубления под бутылки, открывашку и крышки [4]. После завершения обработки изделие будет покрыто лаком.

В результате разработана 3D-модель уникальной сувенирной продукции для Жигулевского пивоваренного завода, определены материал и способ изготовления эксклюзивного изделия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамова О.К., Родионов В.А. Разработка 3D-модели изделия «органайзер для украшений» // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. Самара, 2023. С. 3–5.
2. Родионов В.А., Солодова Н.О. Моделирование обработки матрицы для получения рельефного оттиска на тонколистовом материале // Молодежная наука: вызовы и перспективы: мастер. II Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. Сызрань, 2019. С. 128–130.
3. Андреева Е.А. Художественная работа по дереву. М.: Рипол Классик, 2007. 384 с.
4. Родионов В.А., Солодова Н.О. Моделирование рельефной матрицы для получения оттиска на тонколистовом материале в программе SolidWorks // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. Самара, 2018. С. 112–115.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОСЛЕ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ

Жернаков В.С.¹, д.т.н., профессор, академик Академии наук Республики Башкортостан,
Дубин А.И.², к.т.н., начальник лаборатории ПАО «ОДК-УМПО»,
Конева К.В.³, инженер каф. СМ УУНиТ

¹ Академия наук Республики Башкортостан, г. Уфа, Российская Федерация

² Публичное акционерное общество «Объединенная двигателестроительная корпорация – Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ПАО «ОДК-УМПО»), г. Уфа, Российская Федерация

³ Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Российская Федерация
E-mail: kseniakoneva95@gmail.com

Рассмотрена методика численного моделирования напряженно-деформированного состояния поверхности после дробеструйной обработки. Представлены результаты расчета полей остаточных напряжений в плоских образцах, возникающих после дробеструйной обработки. Исследовано влияние различных параметров процесса на величину и характер распределения остаточных напряжений по глубине образца.

Ключевые слова: дробеструйное упрочнение, остаточные напряжения, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, титановый сплав

NUMERICAL MODELING OF RESIDUAL STRESS STATE AFTER SHOT PEENING

Zhernakov V.S.¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan,
Dubin A.I.², PhD in Engineering Sciences, Head of the laboratory PJSC “UEC-UMPO”,
Koneva K.V.³, Engineer of the Materials Resistance Department

¹ Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia

² Public Joint Stock Company “United Engine Corporation – Ufa Engine Production Association” (PJSC “UEC-UMPO”),

³ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: kseniakoneva95@gmail.com

This paper discusses a technique for numerical modeling of the stress-strain state of a surface after shot peening. The results of calculation of residual stress fields in flat samples arising after shot peening are presented. The influence of various process parameters on the magnitude and allocation of the distribution of residual stresses along the depth of the sample was studied.

Keywords: shot peening, residual stresses, stress-strain state, finite element method, titanium alloy

Известно, что большинство разрушений ответственных деталей ГТД начинается с поверхностного слоя, поэтому для обеспечения прочности таких элементов необходимо повышение качества поверхности. Одной из важнейших характеристик качества поверхностного слоя является уровень и характер распределения сжимающих остаточных напряжений, формирующихся после упрочняющих обработок.

Дробеструйная обработка является одним из наиболее широко применяемых методов поверхностного пластического деформирования, который широко используется для улучшения усталостных характеристик многих ответственных деталей в авиационной и автомобильной промышленности. Важной проблемой при применении упрочняющих обработок является отсутствие методик неразрушающего контроля остаточных напряжений в поверхностном слое детали. Экспериментальные методы определения остаточных напряжений нарушают целостность детали. Поэтому численные модели, основанные на предварительном расчетном прогнозировании технологических остаточных напряжений, представляют большой интерес.

В работе приведены результаты численного моделирования полей остаточных напряжений, формирующихся после дробеструйной обработки. Исследовались образцы (рис. 1), выполненные из титанового сплава ВТ8 (модуль упругости $E = 120$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,32$, предел текучести $\sigma_T = 950$ МПа) [1].

Для исследования из образца был выделен элемент размерами $a = 1$ мм, $b = 1$ мм, $c = 2$ мм (см. рис. 1). Модель дробы представлена в виде керамических шариков диаметром d с упругим поведением (плотность $\rho = 6000$ кг/м³, $E = 250$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$).

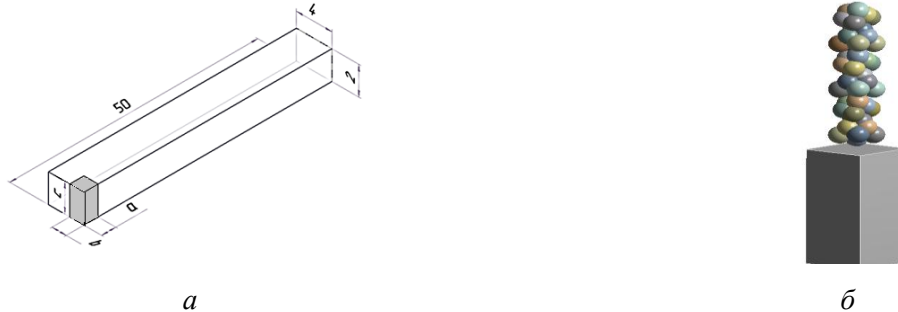


Рис. 1. Геометрические размеры призматического образца (а) и модель дробеструйной обработки участка пластины (б)

Представленная численная модель позволяет задавать такие технологические параметры процесса, как скорость дробы v , расстояние от сопла до поверхности детали L , угол атаки дробы α , материал дробы (рис. 2, а). Выбор оптимального расстояния между дробинками (e) проводился из условия обеспечения равномерного распределения осевых остаточных напряжений σ_x^* на поверхности пластины между соседними частицами дробы.

Численное решение задачи выполнено методом конечных элементов [2, 3]. В конечно-элементной (КЭ) модели образца поверхностный слой в зоне контакта представлен специально выделенным объемом прямоугольных элементов меньшего размера. Такое разбиение сетки увеличивает точность расчета напряжений в поверхностном слое и сокращает время расчета.

В результате расчетов получено остаточное напряженно-деформированное состояние (НДС) для случая $\alpha = 90^\circ$, $v = 60$ м/с, $d = 0,3$ мм. На рис. 3 представлены эпюры компонент остаточных напряжений σ_x^* , σ_y^* и σ_z^* по глубине образца f .

На глубине $f = 16$ мкм возникают наибольшие сжимающие напряжения σ_y^* и σ_x^* , равные -560 и -577 МПа соответственно. На поверхности пластины напряжения σ_y^* и σ_x^* равны -337 и -336 МПа. Глубина слоя сжимающих остаточных напряжений составляет 60 мкм. Можно отметить, что характер распределения напряжений σ_y^* и σ_x^* одинаков. На глубине 89 мкм сжимающие напряжения сменяются растягивающими, затем стабилизируются в околонулевой области. На поверхности пластины сжимающие напряжения σ_z^* составляют -47 МПа, далее постепенно увеличиваясь до максимального значения 179 МПа на глубине 22 мкм, а затем переходя в растягивающие.

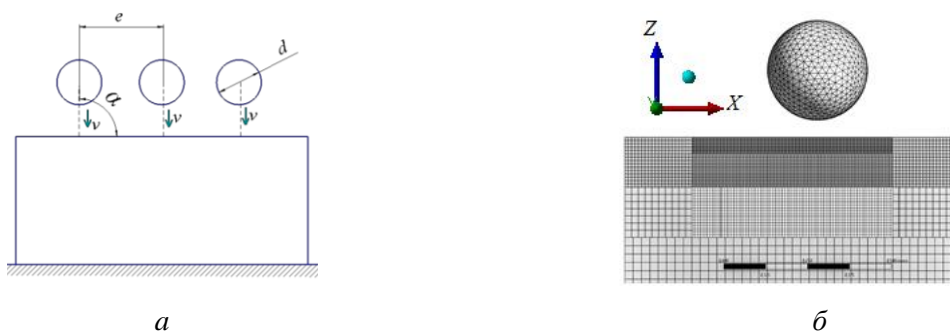


Рис. 2. Схема (а) и КЭ модель (б) процесса дробеструйной обработки

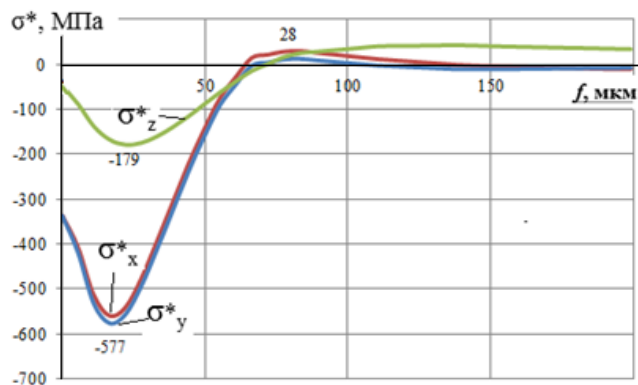


Рис. 3. Эпюры компонент остаточных напряжений σ_y^* , σ_x^* и σ_z^* по глубине пластины f

В работе [4] выполнено экспериментальное исследование остаточных напряжений, полученных при дробеструйном упрочнении. Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных по толщине упрочненного слоя и уровню наибольших сжимающих напряжений показало хорошую сходимость.

Представлена методика численного моделирования остаточного НДС после дробеструйной обработки на плоских поверхностях. Разработанная на основе данной методики численная модель позволяет получить распределение остаточных напряжений по всей поверхности упрочнения для различных параметров технологического процесса.

Применение предлагаемой методики позволяет сократить объем экспериментальных исследований и разработать подходы для назначения режимов дробеструйного упрочнения. Результаты расчета могут быть использованы для учета влияния упрочняющих обработок на НДС и сопротивление усталости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Солонин О.П., Глазунов С.Г. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 400 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1975. 540 с.
3. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г. Основы применения ANSYS Autodyn для решения задач моделирования быстропротекающих процессов: учеб. пособие. 2-е изд. Казань: КНИТУ, 2018. 244 с.
4. Костичев В.Э., Николаев Н.Ю., Павлов В.Ф. Использование динамического моделирования для исследования напряженно-деформированного состояния деталей после дробеструйной обработки // XIII Королёвские чтения: Международная молодежная научная конференция, Самара, 6–8 октября 2015 года: тезисы докладов, Т.1. Самара: Изд-во СГАУ, 2015. С. 386–387.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЛАСТМАСС, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ FDM-ПЕЧАТИ

Карасев Н.И., ассистент, **Носов Н.В.**, профессор, д.т.н., **Галлямов А.Р.**, доцент, к.т.н.

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

Изучение шероховатости поверхностей пластиковых деталей, изготовленных при помощи FDM-печати. Путем изменения режимов печати, а именно скорости печати, можно варьировать шероховатостью, а также качеством точности послойного нанесения. В качестве измерения шероховатости используется профилограф-профилометр «Абрис ПМ-7». Измерение шероховатости производится по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789-73.

Ключевые слова: аддитивное производство, шероховатость, ABS. PLA. Nylon

RESEARCH OF SURFACE ROUGHNESS OF PLASTIC PARTS MANUFACTURED USING FDM PRINTING

Karasev N.I., assistant, **Nosov N.V.**, Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, **Gallyamov A.R.**, Associate Professor, PhD in Engineering Sciences

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

The study of the surface roughness of plastic parts made using FDM printing. By changing the printing modes, namely the printing speed, it is possible to vary the roughness, and precisely the quality of the layered application. A profilograph-profilometer "Abris PM-7" is used as a roughness measurement. Roughness is measured using the midline system in accordance with the nomenclature and ranges of values provided for in GOST 2789-73.

Keywords: Additive manufacturing, roughness, ABS. PLA. Nylon

Современное производство сильно зависит от меняющихся запросов потребителей. Поэтому становится возможным внедрение цифровых технологий в процессы проектирования и производства. Аддитивные технологии успешно себя показывают на протяжении уже нескольких лет. Эта технология позволяет изготавливать модели деталей, детали и прототипы с высокой производительностью, однако качеству поверхности пока уделяется мало внимания. В статье приводятся результаты исследования микрогеометрии поверхности образцов, изготовленных с помощью FDM-печати, в зависимости от режимов послойного нанесения материала. Метод 3D-печати открывает широкие возможности для создания различных объектов с высокой степенью индивидуализации и настраиваемости [3].

Обычно подача материала на 3D-принтерах происходит через специальный механизм под названием «экструдер», который отвечает за продвижение плавленого пластика (или другого материала) через сопло на платформу принтера для создания трехмерного объекта [2].

Метод 3D-печати, также известный как аддитивное производство, представляет собой процесс создания трехмерных объектов путем наращивания материала слой за слоем.

Технология создания модели при 3D-печати:

1. Разработка модели: сначала необходимо иметь двумерный чертеж детали, где указываются материал, технические требования к изготовлению. Затем с помощью программных продуктов разрабатывается 3D-модель объекта, т. е. модель создается с нуля.

2. Преобразование или срезка модели: данная технология связана с передачей модели в программу среза (slicing software), которая анализирует геометрию модели и разбивает ее на тонкие слои (срезы) для последующей печати, учитывая параметры принтера.

3. Настройка принтера: перед печатью требуемый материал (пластик, металл, смола) загружается в принтер, устанавливаются параметры принтера, такие как температура материала, скорость перемещения сопла, диаметр сопла, толщина срезанного слоя и т. д.

4. Технология печати: после всех подготовительных процедур модель импортируется в программу Polygon X, специализированную для 3D-принтеров Picaso Designer X, и запускается процесс печати. Принтер плавит материал до определенной температуры и наносит его с помощью сопла на платформу слой за слоем в соответствии с задачами из программы срезки.

5. Технология охлаждения: по завершении печати модели дается время на охлаждение (на воздухе). Затем ее можно удалить с платформы и провести послепечатные операции (удаление облоя, если необходимо).

6. Контрольные операции: после изготовления объекта следует осмотреть его на предмет дефектов и точности выполнения размеров.

Одним из важнейших параметров качества поверхности деталей (моделей) является исследование шероховатости поверхности. На рис. 1 приведен измерительный комплекс «Абрис ПМ7».

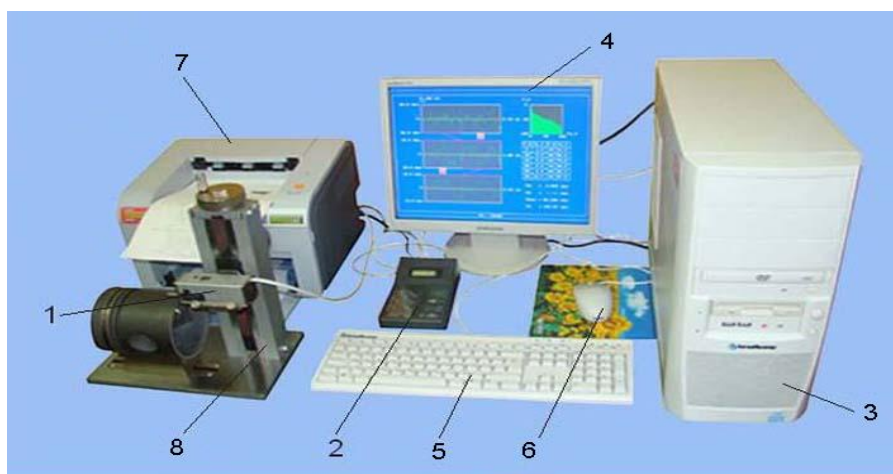


Рис. 1. Внешний вид стационарного измерительного комплекса «Абрис ПМ7»:

1 – первичный преобразователь, 2 – отсчетное устройство, 3 – системный блок, 4 – монитор, 5 – клавиатура, 6 – мышь, 7 – печатающее устройство, 8 – стойка приборная

Этот прибор предназначен для визуального и графического отображения результатов измерения шероховатости на мониторе, их статистической обработки с помощью персонального компьютера и вывода результатов на печать. Основные технические данные прибора «Абрис ПМ7» приведены в табл. 1.

Для исследования шероховатости были изготовлены специальные образцы по технологии печати на 3D-принтере из разных материалов. Для изготовления образцов применялись следующие материалы: ABS. PLA. Neylon.

Таблица 1

Технические данные профилографа-профилометра «Абрис ПМ7»

Определяемые параметры	$Ra, Rz, Rmax, Sm, t_p$
Ra , мкм	0,04–12,5
$Rz, Rmax$, мкм	0,16–50
Sm , мкм	8–250
t_p , %	0,1–99,0
Диапазон измерений, мкм	0,04–250
Вертикальное увеличение	500–100000
Горизонтальное увеличение	20–2000

Определяемые параметры	Ra , Rz , R_{max} , Sm , t_p
Отсечка шага, мкм	0,25; 0,8; 2,5
Длина трассы ощупывания, мм	0,25–7,5
Степень точности по ГОСТ 19300-86	1 класс

1. ABS (Акрилонитрил-бутадиен-стирол)

- Плотность: приблизительно $1,04 \text{ г/см}^3$.
- Температура плавления: около $220\text{--}240 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Удлинение при разрыве: около $10\text{--}30 \%$.
- Жесткость: жесткий пластик с относительно высоким модулем упругости.
- Отличается хорошей ударопрочностью и стойкостью к износу.

2. PLA (Полимер молочной кислоты)

- Плотность: приблизительно $1,25 \text{ г/см}^3$.
- Температура плавления: обычно от 180 до $220 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Удлинение при разрыве: около $5\text{--}10 \%$.
- Жесткость: жесткий пластик, но менее ударопрочный, чем ABS.
- Обладает хорошей стойкостью к изгибу и разрыву.

3. Нейлон (Полиамид)

- Плотность: приблизительно $1,15\text{--}1,2 \text{ г/см}^3$.
- Температура плавления: в зависимости от типа нейлона, обычно от 170 до $280 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Удлинение при разрыве: около $20\text{--}150 \%$ (зависит от типа нейлона).
- Жесткость: гибкий и прочный материал с высокой ударопрочностью.
- Обладает хорошей стойкостью к износу и химическим воздействиям.

3D-печать образцов осуществлялась на разной скорости печати и материала. Практика применения показала, что при печати на принтере PICASO Designer X используются 4 режима, которые представлены в табл. 2. Профилограмма поверхности материала Neylon на режиме печати «Быстро» показана на рис. 2.

Таблица 2

Режимы печати

Режимы печати	Скорость печати, мм/сек
Качество	20
Стандарт	30
Быстро	60
Черновик	80

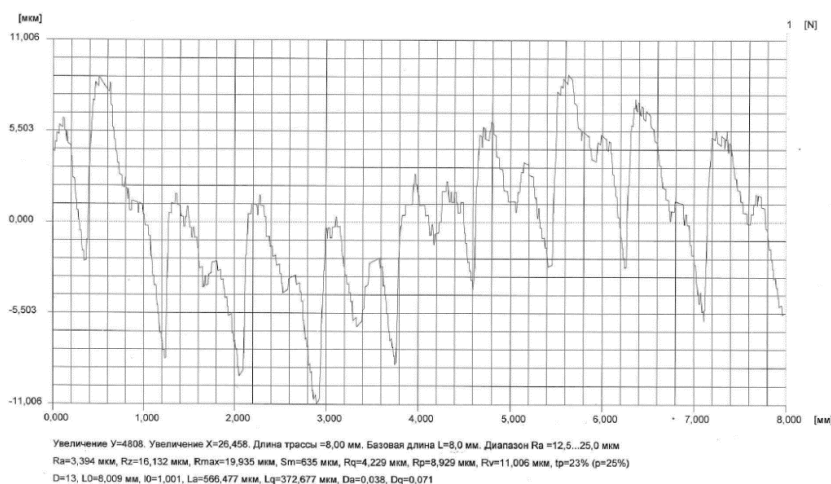


Рис. 2. Профилограмма поверхности материала Neylon на режиме печати «Быстро»

После 3D-печати были проведены исследования шероховатости для трех различных материалов, представленных на рис. 3 (ABS, PLA, Nylon). Результаты приведены в табл. 3–5. Шероховатость была измерена в двух направлениях: продольном и поперечном, определялись 8 параметров шероховатости. Продольная шероховатость определялась по направлению движения сопла, а поперечная – перпендикулярно направлению движения сопла. Наиболее важным параметром шероховатости является среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a , мкм.



Рис. 3. Образцы

Из рис. 4 для Nylon видно, что параметр R_a при увеличении скорости печати меняется незначительно: от $R_a = 4,68$ мкм до $R_a = 3,94$ мкм, при этом шероховатость в поперечном направлении больше шероховатости в продольном направлении.

При малых подачах сопла шероховатость поверхности не зависит от направления записи профилограммы, поэтому шероховатость поверхности является равномерной.

Таблица 3

Исследование шероховатости поверхности образцов из материала Nylon

Сравни- ваемые характе- ристики	Ско- рость печати	Черновик, 80 мм/сек		Быстро, 60 мм/сек		Стандарт, 30 мм/сек		Качество, 20 мм/сек	
		Попереч- ная	Про- дольная	Попереч- ная	Про- дольная	Попереч- ная	Про- дольная	Попереч- ная	Про- дольная
R_a , мкм		4,152	3,642	3,945	3,394	4,681	3,911	4,002	4,393
R_z , мкм		17,689	15,162	17,591	16,132	20,846	17,957	19,123	18,199
R_{max} , мкм		24,123	20,833	20,823	19,935	25,275	22,585	24,421	20,749
S_m , мкм		512	756	486	635	426	582	487	593
R_q , мкм		5,107	4,382	4,779	4,229	5,759	4,747	4,836	5,3
R_p , мкм		11,824	10,261	10,197	8,929	13,008	11,883	11,745	10,096
R_v , мкм		12,299	10,571	10,626	11,006	12,267	10,703	12,676	10,653
t_p , %		19	13	22	23	18	11	16	24

На рис. 4 приведены исследования Ra шероховатости от скорости печати.

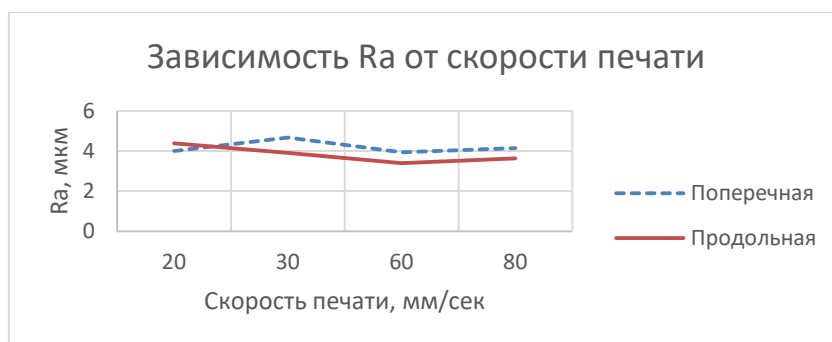


Рис. 4. Зависимость Ra от скорости печати для материала Neylon

Таблица 4

Испытание образцов из материала ABS

Сравниваемые характеристики	Скорость печати	Черновик, 80 мм/сек		Быстро, 60 мм/сек		Стандарт, 30 мм/сек		Качество, 20 мм/сек	
		Поперечная	Продольная	Поперечная	Продольная	Поперечная	Продольная	Поперечная	Продольная
Ra, мкм		4,226	4,205	4,425	4,469	5,232	4,339	5,786	5,148
Rz, мкм		21,42	16,655	17,55	17,798	25,14	20,284	26,90	25,352
Rmax, мкм		27,27	21,84	23,85	25,237	32,35	24,449	31,44	29,568
Sm, мкм		497	781	559	655	792	593	585	599
Rq, мкм		5,406	5,056	5,504	5,381	6,704	5,209	7,223	6,328
Rp, мкм		11,66	11,431	12,29	11,483	14,44	10,243	16,78	12,902
Rv, мкм		15,61	10,409	11,56	13,753	17,91	14,206	14,65	16,665
tp, %		22	14	15	20	19	28	14	21

График для материала ABS представлен на рис. 4.

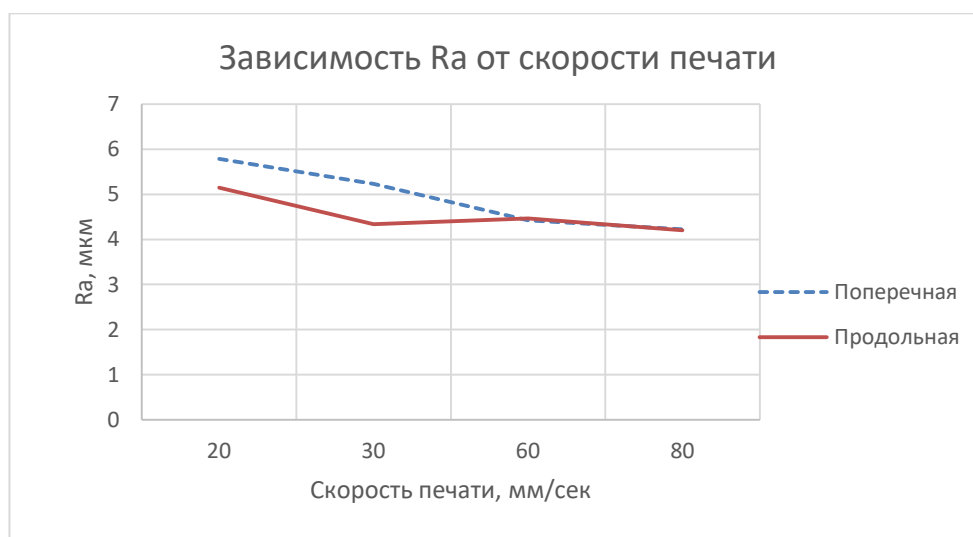


Рис. 5. Зависимость Ra от скорости печати для материала ABS

Из рис. 5 для ABS видно, что параметр Ra при увеличении скорости печати уменьшается с Ra = 5,786 мкм до Ra = 4,226 мкм, при этом шероховатость в поперечном направлении больше шероховатости в продольном направлении. При малых скоростях печати для поперечного направления Ra = 5,232 мкм, для продольного 4,339 мкм. При больших подачах сопла шероховатость поверхности не зависит от направления записи профилограммы, поэтому шероховатость поверхности является равномерной.

Испытание образцов из материала PLA

Сравни- ваемые характе- ристики	Ско- рость печати	Черновик, 80 мм/сек		Быстро, 60 мм/сек		Стандарт, 30 мм/сек		Качество, 20 мм/сек	
		Попереч- ная	Про- дольная	Попереч- ная	Про- дольная	Попереч- ная	Про- дольная	Попереч- ная	Про- дольная
Ra, мкм		5,441	5,791	5,104	4,768	4,486	4,267	4,57	4,325
Rz, мкм		32,06	32,086	30,01	28,731	28,95	26,007	27,92	24,966
Rmax, мкм		38,72	44,361	40,524	34,163	37,08	32,062	34,87	31,678
Sm, мкм		677	692	694	624	401	594	379	609
Rq, мкм		6,979	7,156	6,567	6,105	5,82	5,349	6,013	5,535
Rp, мкм		15,57	14,671	12,60	14,455	16,52	12,21	10,00	7,956
Rv, мкм		23,15	29,69	27,91	19,708	20,55	19,852	24,87	23,721
tp, %		24	40	48	16	10	21	50	58

Графики зависимостей в соответствии с табл. 4 представлены для материала PLA, рис. 5. Для данного материала графики получились наиболее близкими. Это наилучшее рас-положение кривых. Поверхность равномерна по всей своей площади.

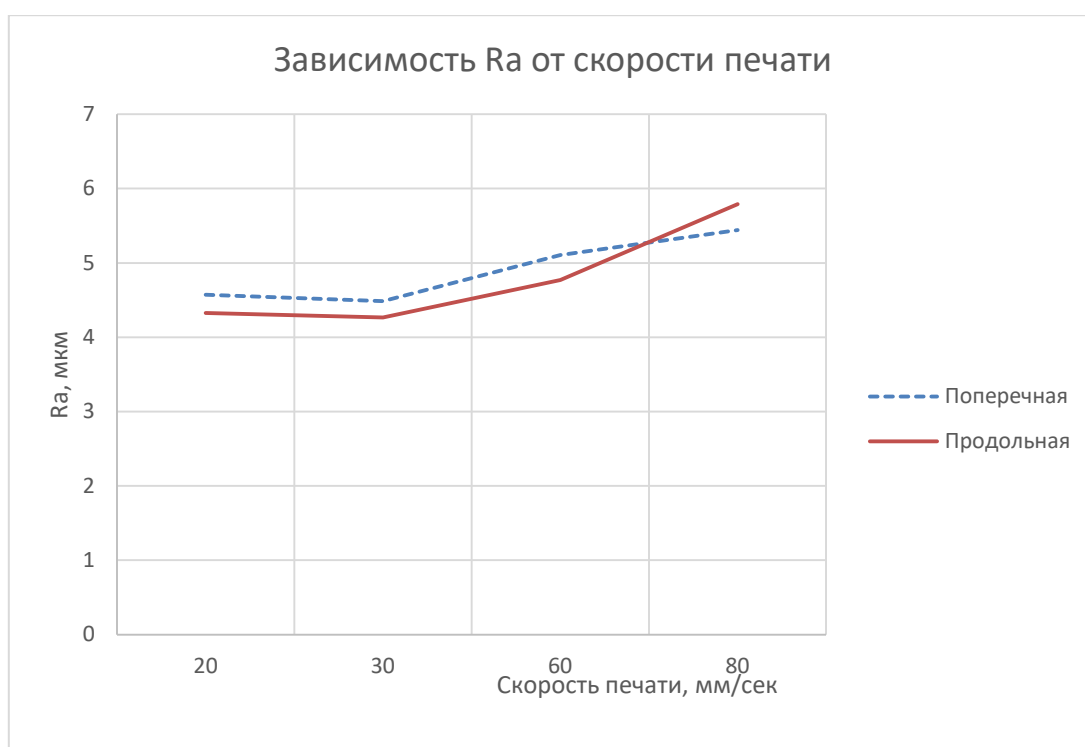


Рис. 6. Зависимость Ra от скорости печати для материала PLA

Из рис. 6 для PLA видно, что параметр Ra при увеличении скорости печати увеличивается с Ra = 4,57 мкм до Ra = 5,44 мкм, при этом шероховатость в поперечном направлении больше шероховатости в продольном и поперечном направлении. При больших скоростях печати для поперечного направления Ra = 5,44 мкм, для продольного 5,79 мкм. При больших подачах сопла шероховатость поверхности не зависит от направления записи профилограммы, поэтому шероховатость поверхности является равномерной.

Выводы. Исходя из средних значений Ra можно сделать вывод, что для такого набора данных материал ABS имеет наилучшее качество поверхности, за которой следует материал PLA, а затем Neylon. Чем выше температура плавления материала, тем ниже шероховатость. Соответственно, по качеству поверхности лучшим из приведенных является Neylon при температуре плавления 190 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности деформации моделей, полученных технологией FDM-печати из различных полимеров / Л.С. Карасев, С.А. Шорохов, А.В. Кротов, С.А. Гамаянов // Технологии и качество. 2022. № 1 (55). С. 48–52. DOI: 10.34216/2587-6147-2022-1-55-48-52.
2. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. Исследование закономерностей формирования точностных параметров деталей при прототипировании // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 2 (50). С. 104–107.
3. Обеспечение качества деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий / М.Ю. Куликов, М.А. Ларионов, Д.В. Гусев, Е.О. Шевчук // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 12 (97). С. 4–10.
4. Литунов С.Н., Слободенюк В.Н., Мельников Д.В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 2 // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 20–24.

УДК 621.01

ПРОЕКТИРОВАНИЕ 3D-МОДЕЛИ НАБОРА ФЛАКОНОВ ДЛЯ ДУХОВ В СТИЛЕ АР-НУВО

Красикова Е.С., студент

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

Рассматривается процесс проектирования изделия «Набор флаконов для духов». Оценивается актуальность изделия, его востребованность на рынке и выявляется служебное назначение продукта. Демонстрируется процесс выбора стилистики, создания эскиза и 3D-модели. Модель разрабатывается в учебной версии SolidWorks2013.

Ключевые слова: художественное изделие, моделирование, стиль ар-нуво

DESIGN OF A 3D MODEL OF A SET OF PERFUME BOTTLES IN THE ART NOUVEAU STYLE

Krasikova E.S., student

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

This paper discusses the design process of the product “Set of perfume bottles”. The relevance of the product, its demand in the market are assessed and the service purpose of the product is identified. The process of choosing a style, creating a sketch and a 3D model is demonstrated. The model is developed in the educational version of SolidWorks 2013.

Keywords: artistic product, modeling, art nouveau style

Форма флакона очень важна для восприятия духов, особенно на стадии выбора. Будем мы пробовать или пройдем мимо, а попробовав, сделаем ли мы выбор в пользу того или иного аромата? Форма или качество упаковки, консервативность или новизна дизайна, яркость или приглушенность цветов – все это влияет на формирование отношения потенциального покупателя к продукту.

Парфюм в привлекательном для нас флаконе имеет намного больше шансов нам понравиться, быть купленным и в дальнейшем оставаться в фаворитах, поэтому создание набора флаконов для духов в уникальном стиле позволит не только привлечь внимание покупателей, но и даст им возможность комбинировать ароматы, позволяя создать свой собственный, оригинальный букет.

Одной из проблем, с которыми сталкиваются любители ароматов, является то, что зачастую флаконы парфюма, произведенные разными брендами, могут не сочетаться между собой и выбиваться из интерьера. Данный набор позволит этого избежать.

Первоочередной задачей в создании изделия является выбор стиля и создание эскиза. В качестве программного обеспечения для создания эскиза был выбран графический редактор SAI 2. Он удобен в использовании и распространяется на бесплатной основе. Для работы над эскизом был выбран стиль ар-нуво. Этот стиль ценится за утонченность, нейтральную цветовую гамму и сочетаемость с другими стилями: от классики до современного стиля и от скандинавской стилистики до лофта.

Характерными чертами стиля ар-нуво являются линии, напоминающие волны или изгибающуюся лозу; приглушенные природные оттенки, чаще всего это бежевые пыльно-розовые, сдержанно-зеленые, коричневые тона; романтические сюжеты – изящные фигуры, цветочные и растительные мотивы. На рис. 1 изображен классический образец этого стиля, авторства Эктора Гимара, французского архитектора и художника-декоратора [1]. Будем опираться на его форму при создании модели.



Рис. 1. Приставной столик, Эктор Гимар

Было создано несколько поисковых эскизов (рис. 2, *a*), из которых мы выбрали и доработали (рис. 2, *б*) вариант, вдохновившись формой апельсиновых долек.



a



б

Рис. 2. Процесс разработки эскиза:
a – поисковые эскизы, *б* – эскиз изделия

В качестве программного обеспечения был выбран SolidWorks 2013. Он обладает простым и удобным интерфейсом на русском языке, в нем присутствует возможность работы с криволинейными поверхностями, а также опция рендеринга и реалистичной визуализации [2]. Также в SolidWorks реализован функционал привязок, который существенно облегчает работу по созданию модели.

Рассмотрим процесс создания модели. Она состоит из трех элементов: подставки под флаконы, ее декоративного обрамления и самих флаконов в количестве пяти штук.

Подставка под флаконы создается операцией «выдавливание» (рис. 3).

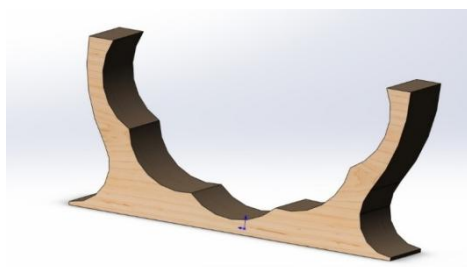


Рис. 3. Модель подставки под флаконы

Моделирование флакона начинается с операции «выдавливание» (рис. 4, *а*). Затем бобышка скругляется, а после для создания тонкостенной бобышки используется функция «оболочка» [3] (рис. 4, *б*).



Рис. 4. Процесс моделирования флакона:
а – результат операции, *б* – скругленное тонкостенное тело

Аналогичным образом моделируется крышка флакона (рис. 5, *а*). Далее выдавливанием и бобышкой по траектории создается атомайзер и трубка к нему (рис. 5, *б*).



Рис. 5. Процесс моделирования крышки флакона:
а – модель флакона с крышкой, *б* – готовая модель флакона

Приступим к моделированию декоративного обрамления. Начинаем с создания поверхности по сечениям. Затем используем массив «зеркальное отражение», чтобы скопировать этот элемент. Далее при помощи вытянутой поверхности обрезаем одну из стоек и получаем треугольное отверстие. При помощи двух вытянутых поверхностей отсекаем часть другой стойки для получения углубления. Используем две поверхности по сечениям, чтобы получить дно и одну из перемычек (рис. 6, *а*). Взаимно отсекаем поверхности и сшиваем их, преобразуя геометрию из поверхностной в твердотельную. Затем добавляем скругления (рис. 6, *б*).



Рис. 6. Финальный этап моделирования стойки:
а – дно и короткая перемычка, *б* – скругленная модель

Воспользовавшись функцией «переместить/копировать» дублируем тело и разворачиваем на 180° (рис. 7).

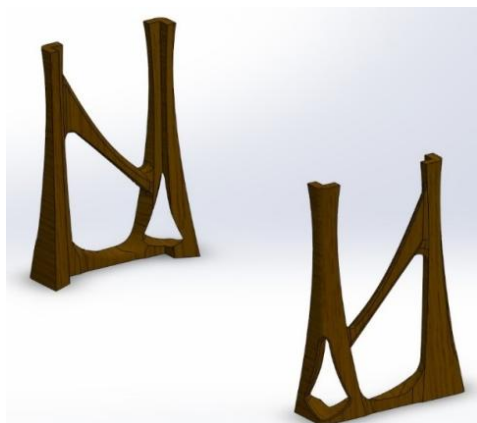


Рис. 7. Результат копирования

Затем создаем бобышку по траектории и получаем длинную перемычку. Далее дважды используем зеркальное отражение. В результате получаем аналогичную перемычку с другой стороны, развернутую на 180° . Комбинируем тела и добавляем скругления (рис. 8).

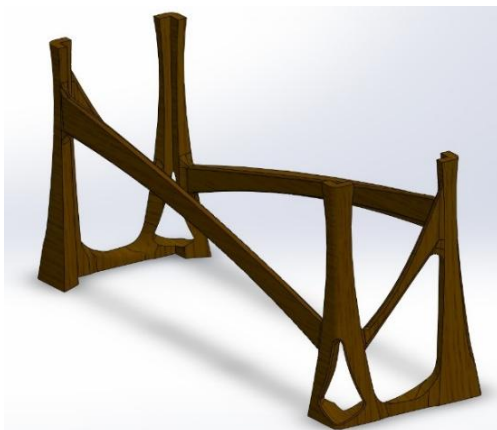


Рис. 8. Длинные перемычки

Модель почти готова, осталось лишь построить утолщение на верхнем конце стоек для более законченного вида. Для этого создаем вытянутую бобышку и копируем на каждую из стоек при помощи зеркального отражения (рис. 9).



Рис. 9. Готовая модель детали

Теперь собираем все детали в сборке и делаем реалистичный рендер (рис. 10).

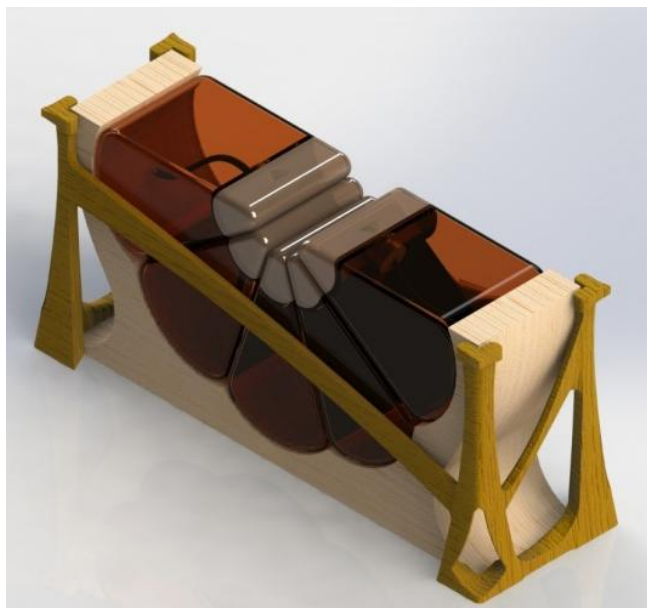


Рис. 10. Рендер готового изделия

Таким образом, мы оценили актуальность изделия, его востребованность на рынке и выявили служебное назначение продукта. Выбрали стилистику, создали эскиз и 3D-модель.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Музей современного искусства (The Museum of Modern Art) <http://www.moma.org/collection/works/3270>
2. Абрамова О.К., Родионов В.А. Разработка 3D-модели изделия «органайзер для украшений» // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. научно-техн. конф. Самара, 2023. С. 3–5.
3. Родионов В.А., Солодова Н.О. Моделирование рельефной матрицы для получения оттиска на тонколистовом материале в программе SolidWorks // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. научно-техн. конф. Самара, 2018. С. 112–115.

УДК 621.01

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ДЕТАЛИ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Малкова А.О., магистрант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: alyonaomalkova@yandex.ru

Проводится анализ шероховатости поверхностей пластиковых деталей, изготовленных с помощью FDM-печати. При изменении режимов печати, например, таких как скорость печати, можно менять параметры шероховатости, что влияет на качество послойного нанесения. Для измерения шероховатости в работе применяется исследовательская установка «Абрис ПМ-7».

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, шероховатость, поверхность, PLA

STUDY OF SURFACE QUALITY WHEN PRODUCING A PART BY ADDITIVE TECHNOLOGY METHOD

Malkova A.O., Master's Degree student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: alyonaomalkova@yandex.ru

This study analyzes the surface roughness of plastic parts manufactured using FDM printing. When changing printing modes, such as printing speed, you can change the roughness parameters, which affects the quality of layer-by-layer deposition. To measure roughness, the research installation "Abris PM-7" is used in this work.

Keywords: 3D printing, additive technologies, roughness, surface, PLA

Аддитивные технологии позволяют изготавливать детали с высокой производительностью, но качеству поверхности в данный момент уделяется недостаточно внимания. Обоснованных методик выбора режимов печати в зависимости от качества и точности изготовления поверхностей моделей нет.

Обычно подача материала на 3D-принтерах происходит через специальный механизм-экструдер, печатную головку FDM-принтера. Экструдер осуществляет подачу нити в специальную нагреваемую металлическую трубку с соплом небольшого диаметра и передачу размягченной нити на поверхность модели [2].

3D-принтер создает трехмерные объекты путем нанесения материала слоями, в соответствии с цифровой моделью объекта по технологии наращивания «субтрактивные технологии», в отличие от операций фрезерования на станках ЧПУ, при которых припуск материала удаляется с заготовки простой формы [2].

Последовательность создания модели при 3D-печати:

1. Так же, как для печати на струйном принтере, требуется цифровой документ (файл PDF или DOC), для 3D-печати требуются файлы 3D-моделей (наиболее распространенный формат – STL). 3D-модели создаются методом ручного компьютерного графического дизайна или за счет 3D-сканирования [1].

2. Преобразование, или срезка модели: данная технология связана с передачей модели в программу срезаки (slicing software), которая анализирует геометрию модели и разбивает ее на тонкие слои (срезы) для последующей печати, учитывая параметры принтера [1].

3. Для обычного струйного принтера используются картриджи с чернилами, а для 3D-принтера – филамент, нитеобразный пластик, сделанный из различных материалов.

4. Затем модель импортируется в программу Polygon X, специализированную для 3D-принтеров Picaso Designer X, и запускается процесс печати.

Технологические особенности 3D-печати.

На 3D-принтере устанавливаются следующие параметры: температура материала, продольное и поперечное перемещение сопла, диаметр сопла, толщина срезанного слоя. Продольное перемещение соответствует скорости перемещения сопла, а поперечное – подаче сопла в перпендикулярном направлении [3].

Во время печати принтер считывает 3D-печатный файл, содержащий данные трехмерной модели, и наносит последовательные слои жидкого материала, наращивая трехмерную модель по серии поперечных сечений. Эти слои соединяются или сплавляются вместе для создания объекта заданной формы и микрорельефа [3].

После окончания печати модели производится охлаждение на воздухе. Затем модель удаляется с платформы и проводятся послепечатные операции.

Исследование шероховатости поверхности модели проводилось на профилографе-профилометре АБРИС-ПМ7. На рис. 1 представлен измерительный комплекс «Абрис ПМ7», который включает измерительную головку, приспособление, где базируется образец, устройство настройки положения датчика, компьютер, измерительное устройство, программное обеспечение. Данная установка предназначена для измерения параметров шероховатости поверхности в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789-73.

Для исследования шероховатости изготовлены специальные образцы, напечатанные на 3D-принтере из пластика PLA плоской формы (рис. 2).



Рис. 1. Профилограф-профилометр АБРИС-ПМ



Рис. 2. Исследовательские образцы

После 3D-печати образцы устанавливались на приспособлении и проводилось исследование шероховатости. Шероховатость измерялась в поперечном направлении, т. е. в направлении, перпендикулярном направлению движения сопла.

На рис. 3 показана профилограмма поверхности модели, записанной в поперечном направлении.

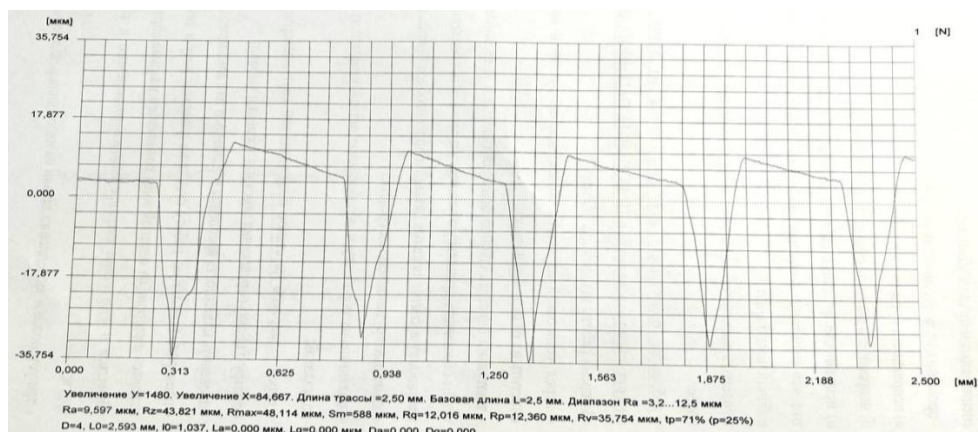


Рис. 3. Профилограмма поверхности для образца 025

Наиболее важным параметром шероховатости является среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a , мкм.

К основным характеристикам пластика PLA относятся:

- плотность 1,21–1,43 г/см³;
- биосовместимость;
- биоразлагаемость;
- прочность и гибкость;
- долговечность в обычных условиях;
- температура плавления 160–90 °С;
- температура стеклования 60–65 °С;
- модуль упругости при растяжении 2,7–16 ГПа;
- сжатие под воздействием высоких температур;
- горение без остатка и без выделения токсичных веществ;
- деградация под воздействием УФ-излучения;
- стойкость к температуре до 110 °С.

3D-печать образцов осуществлялись на следующих режимах: диаметр сопла 0,4 мм, скорость продольной печати 20 мм/сек, поперечная подача изменялась в диапазоне 0,1–0,15–0,25–0,3 мм/ход. В таблице приведены результаты исследования параметров шероховатости поверхности.

Исследование шероховатости поверхности образцов из материала PLA

Параметры шероховатости	Поперечная подача, мм/ход			
	0,1	0,15	0,25	0,3
R_a , мкм	8,759	11,557	9,597	11,096
R_z , мкм	39,181	50,139	43,821	47,471
R_{max} , мкм	48,414	52,169	48,114	49,714
S_m , мкм	260	330	280	350

На рис. 4 приведены исследования зависимости шероховатости R_a от скорости поперечной подачи печати. Для материала PLA видно, что параметр R_a при увеличении скорости подачи печати варьируется от $R_a = 8,759$ мкм до $R_a = 11,557$ мкм.

Для наглядности сравнения результатов построены графики для каждого показателя в соответствии с режимами печати, а именно скорости печати. Графики значений S_m , R_z для материала PLA представлены на рис. 5, 6.

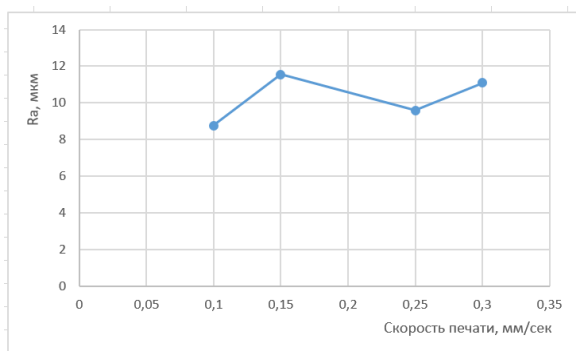


Рис. 4. Влияние поперечной подачи печати (PLA) на средний шаг микронеровностей R_a

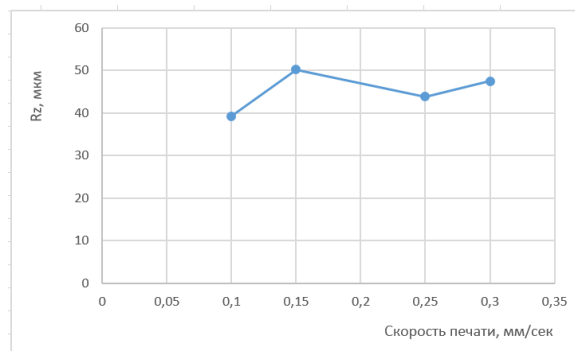


Рис. 5. Влияние поперечной подачи печати (PLA) на средний шаг микронеровностей и R_z

Для материала PLA видно, что параметр R_z при увеличении скорости печати варьируется от 39,181 до 50,139 мкм.

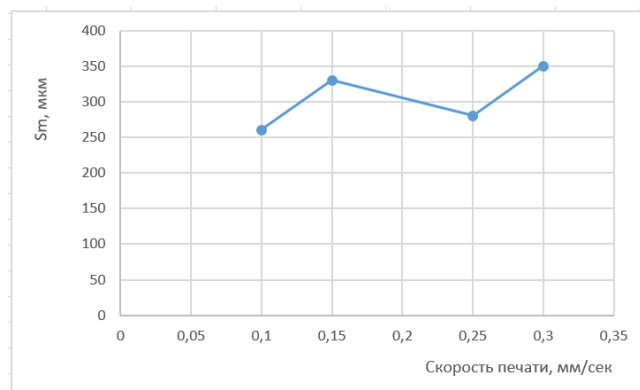


Рис. 6. Влияние поперечной подачи печати (PLA) на средний шаг микронеровностей S_m

Для материала PLA видно, что параметр S_m при увеличении скорости печати варьируется от 260 мкм до 350 мкм.

В ходе проведенных исследований получены зависимости параметров шероховатости R_a и R_z , S_m от скорости сканирования и на основе полученных данных построены графики. Было определено, что на шаг влияют параметры высоты слоя и диаметр сопла. С увеличением шага увеличивается величина шероховатости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Косилова А.Г., Мещерякова Р.К. Справочник технолога машиностроителя. В 2 т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1985. 655 с.
2. Исследование зависимости шероховатости, морфологии поверхности и количества дефектов структуры от мощности лазера, скорости сканирования и типа штриховки в жаропрочном сплаве, синтезированном методом СЛС / М.А. Лаптева, Н.А. Белова, А.Н. Раевских, Е.В. Филонова // Труды ВИАМ, 2016. № 9.
3. Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering / G.A. Longhitano, M.A. Larosa, A.L.J. Munhoza, Zavagliaa C.A. Carvalho, M.C.F. Ierardia // Materials Research, 2015. Vol. 18 (4). Pp. 838–842.

ПРИМЕРЫ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В АВИАСТРОЕНИИ

Низамов Д.А., студент

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация
E-mail: nizamovdaniil15@gmail.com*

На сегодняшний день тема топологической оптимизации деталей конструкции самолета является актуальным направлением в области проектирования. В данной статье рассматриваются принципы работы топологической оптимизации на примере оптимизации кронштейна для самолета, ее преимущества и недостатки, а также применение данного подхода в различных отраслях промышленности благодаря высокоразвитым аддитивным технологиям. Результаты исследования и практические примеры демонстрируют эффективность топологической оптимизации.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, 3D-печать

EXAMPLES OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION IN THE AIRCRAFT INDUSTRY

Nizamov D.A., student

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation
E-mail: nizamovdaniil15@gmail.com*

Today, the topic of topological optimization of aircraft structural parts is a current trend in the field of design. This article discusses the principles of topology optimization using the example of optimization of an aircraft bracket, its advantages and disadvantages, as well as the application of this approach in various industries thanks to highly developed additive technologies. Research results and practical examples demonstrate the effectiveness of topology optimization.

Keywords: topology optimization, 3D printing

Топологическая оптимизация – это метод инженерной оптимизации, который применяется для создания оптимальных форм и структур в различных областях дизайна и проектирования, таких как строительство, машиностроение, авиационная промышленность и др.

Суть метода заключается в том, чтобы найти оптимальную форму или структуру, учитывая заданные ограничения и цели проектирования. Согласно основной идее топологической оптимизации, лишний материал удаляется из детали, а оставшийся материал распределяется таким образом, чтобы создать оптимальную жесткость и прочность. Это позволяет существенно сократить массу конструкции.

Одним из основных преимуществ топологической оптимизации является возможность автоматизированного поиска оптимальных форм, что существенно сокращает время и затраты на проектирование. Кроме того, этот метод позволяет создавать более эффективные и инновационные решения, которые не всегда могут быть найдены с помощью традиционных методов.

Топологическая оптимизация часто применяется в аддитивном производстве, таком как 3D-печать, где проектирование сложных форм и структур становится более доступным. С помощью этого метода можно создавать легкие и прочные детали.

Важным аспектом топологической оптимизации является возможность заранее предсказать поведение конструкции в различных условиях эксплуатации. Благодаря математическим моделям и симуляциям разработчики могут оценить прочность и жесткость конструкции, учесть динамические нагрузки и обеспечить оптимальное распределение материала за счет минимальных изменений в геометрии.

Топологическая оптимизация является мощным инструментом, который позволяет инженерам создавать более эффективные и инновационные решения в различных областях промышленности. Ее применение способствует улучшению качества продукции, сокращению времени и затрат на проектирование, а также увеличению конкурентоспособности на рынке.

В авиационной промышленности снижение веса является первостепенной задачей, поэтому топологическая оптимизация в данной индустрии является наиболее эффективной.

В современном авиастроении активно применяются технологии, которые способствуют снижению веса самолета. Например, композитные материалы. Однако существует множество других технологических новшеств, которые также позволяют эффективно снизить вес конструкции. Для проведения топологической оптимизации необходимо иметь модель детали или область проектирования. Задаются области, которые могут быть заполнены материалом, а также нагрузки и ограничения, действующие на конструкцию. С помощью специальных алгоритмов происходит пошаговое удаление материала из зоны, где его можно убрать без ущерба для прочности конструкции. Таким образом, на выходе получается оптимальная структура с минимальным количеством материала. Мировая практика показывает, что наиболее часто используемая деталь для топологической оптимизации – это кронштейн. Поэтому топологическая оптимизация показана на примере титанового кронштейна (материал ВТ6, масса равна 286,2 г). Его первоначальный вид представлен на рис. 1. Схема нагрузки детали представлен на рис. 2. Задача заключается в том, чтобы создать две новые детали, одну из которых можно изготовить традиционным методом (штамповка и фрезеровка), а другую – с помощью аддитивных технологий.

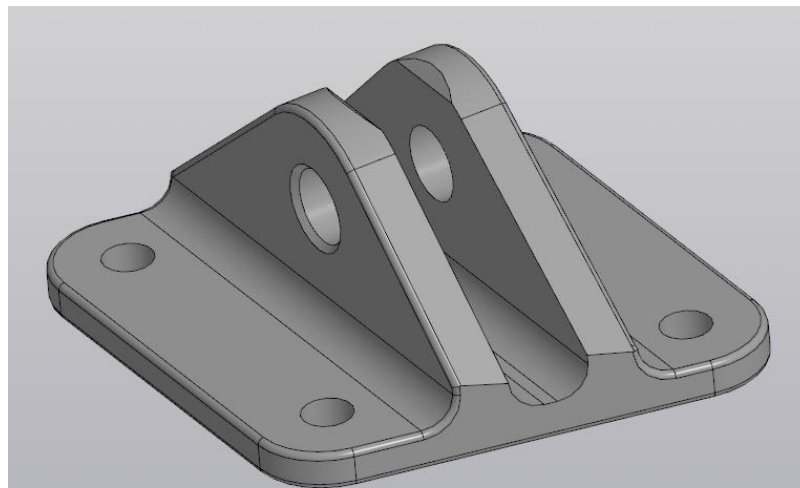


Рис. 1. Исходный вид кронштейна

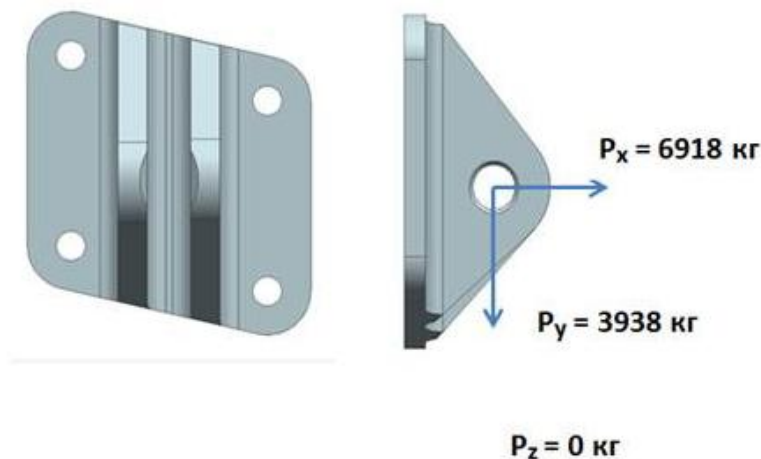


Рис. 2. Схема нагрузки детали

В качестве программного обеспечения использовалась САД (Система автоматизированного проектирования) система Siemens NX. В модуле «топологическая оптимизация» была задана область проектирования. В качестве области проектирования был взят сам объем данного кронштейна, так как неизвестна исходная область проектирования. Далее был задан диаметр бобышек, объем которых должен содержаться в оптимизации, после чего были заданы ограничения анализа и действующие нагрузки.

Для кронштейна, который будет изготавливаться с помощью аддитивных технологий, было указано ограничение оптимизации – сокращение 60 % от исходной массы. Было проведено девять различных итераций, в результате чего была определена оптимальная форма, представленная на рис. 3. Данная модель удовлетворяет прочностным показателям и имеет массу, равную 115 г.

Существует возможность изменить форму данного кронштейна, но в данном случае он подходит для 3D-печати. Следовательно, видоизменять форму нецелесообразно.

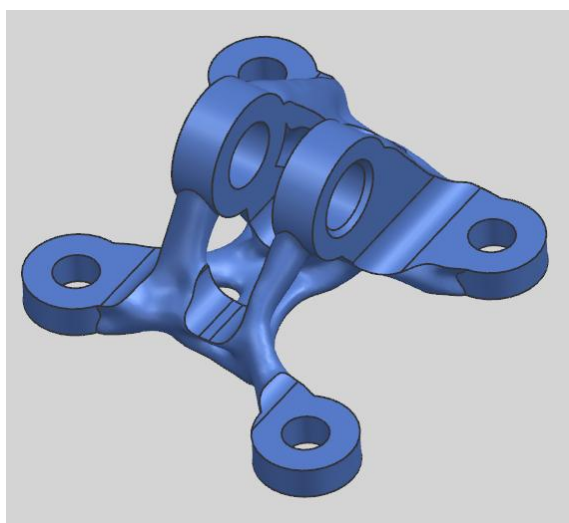


Рис. 3. Топологическая оптимизация кронштейна для аддитивного производства

Для создания кронштейна, который будет изготавливаться с помощью традиционных технологий, была взята диаграмма напряжений и перемещений. С помощью этого был построен оптимизированный кронштейн. Результатом стало сокращение массы на 20 % (масса детали равна 239,4 г). Модель представлена на рис. 4. Данный вариант является промежуточным «гибридом» между оптимизированной деталью и исходным кронштейном. Явным преимуществом такого способа проектирования является доступность, т. е. возможность создания его на производстве с помощью традиционных технологий.

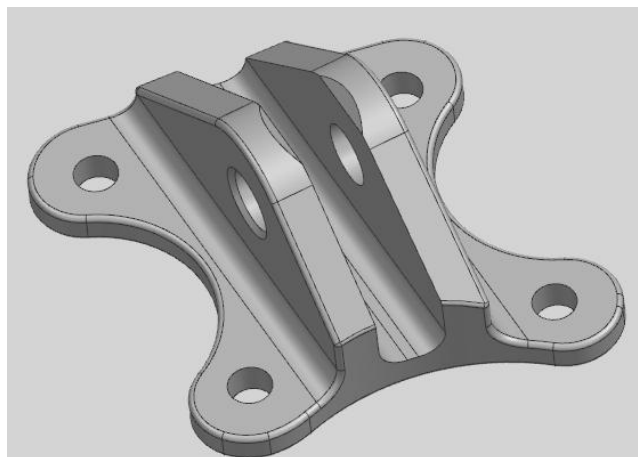


Рис. 4. Оптимизированная деталь для традиционного производства

На данный момент исходя из вышеуказанных данных получилось сократить массу на 60 и 20 %.

Если рассматривать только традиционное производство, то данный способ в большинстве случаев оптимален при проектировании с нуля, так как сокращать массу уже имеющей детали на малый процент нецелесообразно. При проектировании с нуля существует возможность анализа полученной конструкции. На основе этого можно самостоятельно оптимизировать конструкцию.

Если рассматривать производство с помощью аддитивных технологий, то данный способ снижения массы является наиболее эффективным. Очевидно, что могут изменяться свойства материала при печати металлом как в лучшую, так и в худшую сторону. Также существует большое количество способов печати. При выборе какого-либо метода печати следует учитывать это при оптимизации модели.

В заключение следует отметить, что топологическая оптимизация представляет собой инновационный подход к проектированию и созданию конструкций в авиастроении, который позволяет существенно сократить массу и улучшить характеристики воздушных средств. Применение этого метода способствует снижению расхода топлива, уменьшению выбросов и повышению безопасности полетов. В будущем топологическая оптимизация будет играть все более важную роль в развитии авиационной промышленности и создании новых поколений воздушных судов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 3D-печать титаном [Электронный ресурс]. URL: <https://sprint3d.ru/categories/3d-pechat/3d-pechat-titanom/> (дата обращения: 03.03.2024).
2. Разоренов С.В. Динамическая прочность титанового сплава ВТ6, полученного методом прямого лазерного выращивания // Физическая мезомеханика. 3. 24. С. 17.
3. Топологическая оптимизация и 3D-печать как пример взаимного развития [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.iqb.ru/topology-optimization-3d-printing/?ysclid=ltbs2vniwn989960054> (дата обращения: 03.03.2024).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИДРОМАГИСТРАЛЕЙ НА САМОЛЕТЕ

Никитин К.А., студент

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация
E-mail: workpochtakirill@mail.ru*

Представлены результаты процесса проектирования трубопровода для изготовления на трубогибочном станке с ЧПУ с помощью методики реверс-инжиниринга. Описан процесс сканирования и создания 3D-модели и чертежей, рекомендации для геометрии труб.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, трубопровод, 3D-сканирование

DESIGN OF HYDRAULIC LINES ON THE AIRPLANE

Nikitin K.A., student

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation
E-mail: workpochtakirill@mail.ru*

The results of the process of designing a pipeline for fabrication on a CNC tube bending machine using reverse-engineering techniques are presented. The process of scanning, creation of 3D model and drawings, pipe geometry recommendations is described.

Keywords: reverse engineering, pipeline, 3D scanning

В современной авиационной промышленности проектирование и изготовление авиационных трубопроводов является одной из ключевых задач. Трубопроводные системы играют важную роль в обеспечении функционирования различных систем самолета, таких как гидравлические, пневматические, топливные и др. Одним из передовых методов проектирования и изготовления авиационных трубопроводов является применение трубогибочных станков с ЧПУ и реверс-инжиниринга. Реверс-инжиниринг представляет собой процесс анализа существующих изделий или систем с целью создания их цифровых копий. В контексте авиационных трубопроводных систем это позволяет получить точные данные о геометрии и размерах трубопроводов, а также о расположении их компонентов. Для получения данных о геометрии трубопроводов используется метод 3D-сканирования. Сканирование производится с использованием специальных 3D-сканеров, которые позволяют получить облако точек – набор координат, определяющих форму и размеры объекта в трехмерном пространстве.

Будет рассматриваться трубогибочный станок. На нем можно выполнять гибку труб методом обкатки, намотки. Максимальная длина трубопровода в прямом виде 3500 мм, рекомендуемая максимальная длина трубопровода диаметром до 12 мм – не более 2000 мм. Увеличение длины ведет к деформации согнутой части трубы под собственным весом во время процесса гибки на станке. В качестве гибочной оснастки используется ролик, радиусгиба трубы напрямую зависит от размеров оснастки. Дорн при гибке не применяется. Гибка методом обкатки на трубогибочном станке применяется для труб диаметром от 6 до 10 мм, методом намотки – от 12 до 90 мм включительно. При втором методе в качестве гибочной оснастки используется матрица гибочная с зажимами, радиусгиба труба напрямую зависит от размера оснастки.

С помощью 3D-сканирования было получено облако точек, из которого вытекает средняя линия трубопровода. С помощью этой линии была сделана модель в Siemens NX (рис. 1). Деталь сканировалась по несколько раз для получения правильного расположения и захвата всех критических точек для построения. Вторым способом другой трубопровод

был отсканирован и полученное облако точек было перенесено в программное обеспечение Geomagic Design X для последующей обработки (рис. 2).

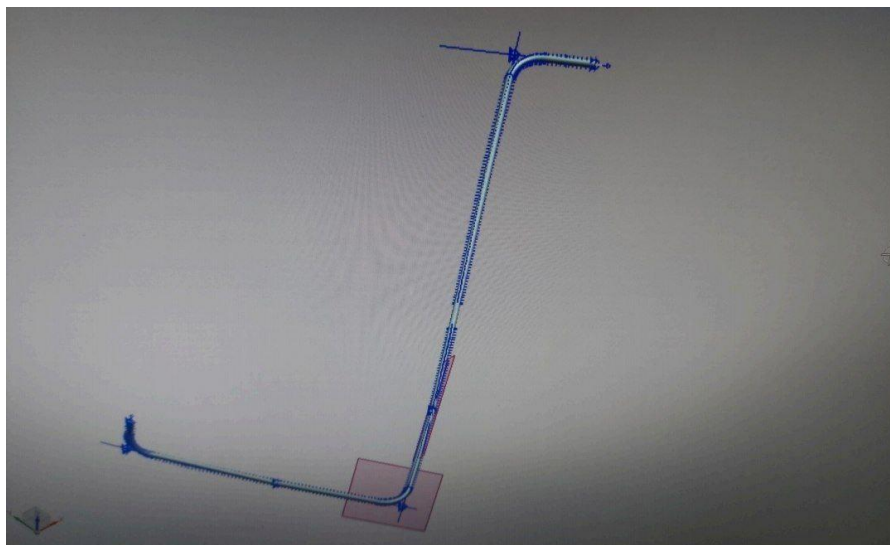


Рис. 1. Рассматриваемая деталь: облако точек, полученное после сканирования и сделанное в Siemens NX

Данное программное обеспечение позволяет выполнить автоматическое разбиение на поверхности, основываясь на облаке точек, и осуществить пользовательские настройки. Затем можно создать группу простых поверхностей, которые мы будем использовать для воссоздания тела сканирования, что поможет нам получить более точные размеры данной детали.

Исходный эскиз, преобразованный в вектор, передается в иное программное обеспечение, в частности Siemens NX. Это ПО позволяет доработать полученные материалы, уточнить размеры, исправить углы. Благодаря операции вращения создается тело, на котором выполняются требуемые технологические отверстия заданных диаметров и наносятся необходимые скругления. После этого 3D-модель оснастки, представляющая собой ее точную цифровую копию, считается готовой. Затем в NX формируются рабочие чертежи, согласно которым будет выполняться обработка заготовок. Остальные трубопроводы будут обрабатываться идентичным способом с применением того же самого программного обеспечения и сканера.

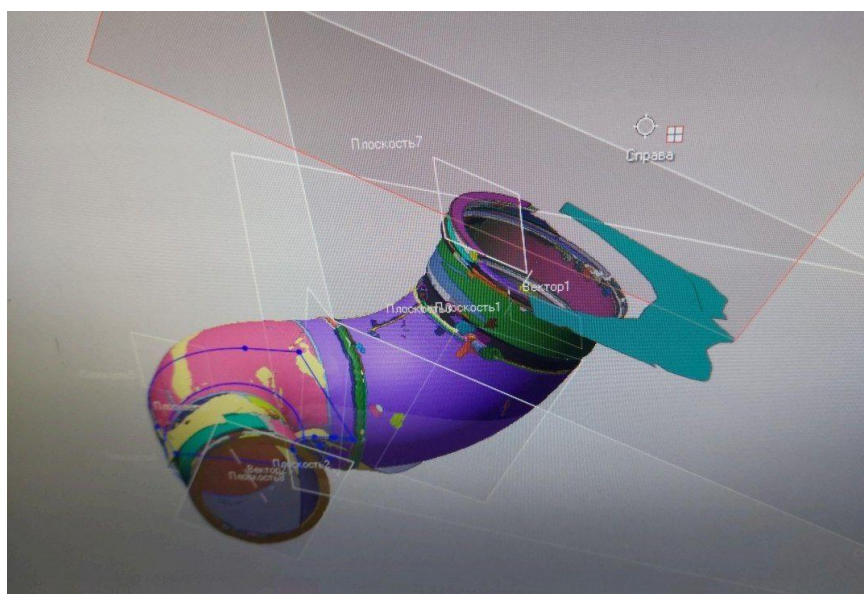


Рис. 2. Результат обработки облака точек в Geomagic Design X

Для станка длины прямых участков труб между гибами в зависимости от диаметра труб рекомендуется выбирать не менее $2,5D$, где D – наружный диаметр трубы. В случае невозможности обеспечения длин прямых участков труб возможно применение одного из вариантов:

- 1) для сварных трубопроводов добавить сварной шов на коротком прямом участке;
- 2) для цельно натянутых трубопроводов типа «Z» увеличить длину сбег, если это возможно;
- 3) для цельно натянутых трубопроводов типа «U», выполняемых двумя гибами подряд, убрать прямой участок, выполнив разворот трубы за один гиб.

Таким образом, создание гидромагистралей для трубогибочного станка с помощью применения аддитивных технологий представляет собой действенный способ повышения эффективности производства и снижения затрат на разработку нового оборудования. Преимуществами данного метода являются возможность сокращения времени на гибку трубопроводов и увеличение количества производимых гидромагистралей. Однако применение технологии реверс-инжиниринга сопряжено с некоторыми сложностями, включая трудность точного воссоздания размеров и форм исходных образцов и необходимость в дорогом оборудовании для осуществления обратного инжиниринга. Вместе с тем потенциал развития данной технологии в контексте изготовления оснастки для разного оборудования остается высоким. С учетом непрерывного прогресса технологий можно надеяться на усовершенствование процессов проектирования и производства, что, в конечном счете, будет способствовать повышению эффективности и конкурентоспособности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Raymer Daniel P. Aircraft design: A conceptual approach. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992. 760 p. ISBN 0930403517.
2. Sadraey Mohammad H. Aircraft design: A systems engineering. Wiley, 2012. 808 p. ISBN 9781119953401.
3. Fielding John P. Introduction to aircraft design. Cambridge University Press, 1999. 278 p. ISBN 0521657229.

УДК 628.147.22

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КОРРОЗИИ

Парфёнов К.В., ассистент, **Ибатуллин И.Д.**, профессор, д.т.н.

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

Работа посвящена разработке энергетической модели коррозионного процесса и изнашивания материала под воздействием температурных флуктуаций. Используя закон Аррениуса, авторы предлагают уравнение, учитывающее влияние различных энергий на изменение внутренней энергии поверхностного слоя. Представлены условия разрушения, учитывающие пластическую деформацию и физико-химическое взаимодействие. Эмпирическое уравнение связывает долговечность материала с энергетическим барьером.

Ключевые слова: энергетическая модель, закон Аррениуса, энергетический барьер, коррозия

DEVELOPMENT OF AN ENERGY MODEL OF THE CORROSION PROCESS

Parfenov K.V., Assistant Professor, **Ibatullin I.D.**, Professor, Grand PhD in Engineering Sciences

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

The work is devoted to the development of an energy model of the corrosion process and material wear under the influence of temperature fluctuations. Using the Arrhenius law, the authors propose an equation that takes into account the influence of various energies on the change in the internal energy of the surface layer. The conditions of destruction, taking into account plastic deformation and physico-chemical interaction, are presented. An empirical equation relates the durability of a material to an energy barrier.

Ключевые слова: energy model, Arrhenius law, energy barrier, corrosion

Современное промышленное производство неотделимо от вопросов эффективного использования ресурсов и обеспечения долговечности технических систем. Одним из основных факторов, влияющих на надежность и стойкость материалов, является коррозионный процесс. Коррозия как результат химической реакции металла с окружающей средой неизбежно приводит к потере интегритета материалов и, следовательно, снижению их работоспособности.

В свете растущих требований к энергоэффективности и устойчивости производства необходимость разработки точных и предсказуемых моделей коррозионных процессов становится более актуальной.

Целью данной работы является разработка энергетической модели коррозионного процесса, направленная на более глубокое понимание механизмов, лежащих в основе взаимодействия металлических материалов с различными средами. Акцент делается на анализе энергетических аспектов коррозии с целью предоставления более эффективных методов контроля и предотвращения данного процесса.

Благодаря исследованиям в области деформации и разрушения материалов мы можем говорить о том, что химические, механохимические и механические неравновесные процессы обладают общим термоактивационным характером. Это значит, что они протекают, преодолевая своего рода энергетический барьер. Согласно кинетической теории, поверхностный слой материала представляет собой открытую термодинамическую систему, состоящую из большого числа кинетических единиц, участвующих в термодинамических процессах, совершаемых, в случае коррозии, под действием электродвижущих сил. Эти единицы могут быть атомами и молекулами вещества, совершающими тепловые колебания, и в соответствии с теорией Больцмана могут периодически подвергаться термическим флуктуациям, когда отдельные единицы могут преодолевать барьеры значительной величины.

Идея о том, что скорость коррозионного процесса определяется энергетическим барьером, не нова [1].

При описании явлений, происходящих посредством термоактивационного механизма, используются следующие предположения.

Механизмы накопления повреждений и усталостного разрушения поверхностного слоя основаны на термоактивируемых кинетических процессах.

Связь между скоростью изнашивания материала и внешними факторами определяется через его активационные параметры: энергию активации U_0 и структурно-чувствительный коэффициент γ :

$$I = f(U_0, \gamma, \sigma, T, \dots), \quad (1)$$

где f – коэффициент трения; U_0 – энергия активации разрушения поверхностного слоя; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – напряжение; T – абсолютная температура.

В качестве основы для объяснения процесса изнашивания при воздействии температурных флуктуаций мы можем использовать факт, согласно которому скорость распространения усталостных трещин соответствует определенному закону, известному как закон Аррениуса. Попросту говоря, мы применяем математическую закономерность, связывающую скорость распространения трещин с изменениями температуры, для того чтобы понять механизм изнашивания материала [2]. Различные эксперименты подтвердили точность расчетных моделей, которые основаны на идеях о термофлуктуациях. Преимущество этих феноменологических формулировок заключается в их способности описывать процесс изнашивания в различных условиях напряжения и деформации материалов. В работах [3–6] высказывается идея применения данных уравнений для описания процесса изнашивания. Исследованию кинетических моделей посвящены труды С.Б. Ратнера, М.А. Бартенева, Ю.Н. Дроздова, Д.Г. Громаковского, А.Г. Ковшова, Т.Ф. Куинна, И. Усуи и др. [3, 7–10].

$$TR \ln\left(\frac{t}{\tau_0}\right) + V_m 10^{-6} \left(\frac{\Delta\sigma^2}{2E} + \sigma \bar{\epsilon} t\right) + \Delta u_H + \Delta g \geq 0, \quad (2)$$

где T – абсолютная температура, °С; R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К; t – время пребывания в нагруженном состоянии, с; τ_0 – период тепловых колебаний атомов; V_m – молярный объем, мм³/моль; $\Delta\sigma$ – изменение эквивалентного напряжения; E – модуль упругости, МПа; σ – эквивалентное напряжение; $\bar{\epsilon} t$ – средняя скорость неупругой деформации; Δu_H – исходный уровень накопленной энергии, кДж/моль; Δg – изменение потенциала Гиббса под влиянием внешней среды.

В работе [2] автором была рассчитана модель (2), которая учитывает вклад в рост внутренней энергии материала поверхностного слоя повышения связанной энергии за счет роста энтропии (первое слагаемое), увеличения энергии упругих искажений кристаллической решетки в результате действия упругих и пластических деформаций (второе слагаемое), накопления энергии в процессе технологической обработки поверхности (третье слагаемое), изменения внутренней энергии в результате физико-химического взаимодействия поверхностного слоя с внешней средой (четвертое слагаемое). В работе [11] показано, что условие (2) может быть также получено из термодинамического анализа элементарных кинетических актов. Левая часть условия (2), представленная в виде функции времени, является кинетической моделью повреждаемости материалов, которая при значениях $t < t_p$, где t_p – долговечность материала, описывает процесс роста внутренней энергии системы, а в момент времени $t = t_p$ вызывает достижение условия разрушения.

Известно, что в процессе трения происходит повышение начальной температуры поверхностных слоев. Поэтому для приближения полученной модели к реальным условиям уместно записать:

$$T = T_0 + \Delta T_f, \quad (3)$$

где T_0 – начальная температура поверхностных слоев; ΔT_f – изменение температуры в процессе трения.

С учетом вышесказанного, пренебрегая упругой деформацией материалов и считая малой их начальную пластическую деформацию, условие (2) можно упрощенно записать в виде

$$TR \ln\left(\frac{t}{\tau_0}\right) + V_m 10^{-6} \sigma \bar{\epsilon} t + \Delta g = u_0, \quad (4)$$

где T – абсолютная температура, °С; R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К; t – время пребывания в нагруженном состоянии, с; τ_0 – период тепловых колебаний атомов, V_m – молярный объем, мм³/моль; σ – эквивалентное напряжение; $\bar{\epsilon} t$ – средняя скорость неупругой деформации; Δu_H – исходный уровень накопленной энергии, кДж/моль; Δg – изменение потенциала Гиббса под влиянием внешней среды; u_0 – энергетический барьер.

В исходном состоянии конструкционных материалов запасенная энергия, представленная суммой молярных энергий в левой части выражения (2), не достигает энергии активации, чем обеспечивается устойчивость системы. Однако с течением времени условие разрушения может выполняться при любых значениях нагрузки и температуры за счет роста первых двух слагаемых. В момент достижения равенства (4) длительность приложения нагрузки становится эквивалентной времени до разрушения (долговечности) материала, т. е. $t = t_p$, а пластическая деформация становится критической для данного состояния материала $\Delta \epsilon = \bar{\epsilon} t_p = \Delta \epsilon_{\text{крит}}$; отсюда, выразив время до разрушения t_p , получим уравнение долговечности:

$$t_p = \tau_0 \exp\left(\frac{u_0 - V_m 10^6 \sigma \Delta \epsilon_{\text{крит}} - \Delta g}{RT}\right), \quad (5)$$

где τ_0 – период тепловых колебаний атомов; u_0 – энергетический барьер; V_m – молярный объем, мм³/моль; σ – эквивалентное напряжение; $\Delta \epsilon_{\text{крит}}$ – критическая пластическая деформация; Δg – изменение потенциала Гиббса под влиянием внешней среды; R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К; T – абсолютная температура, °С.

Если в выражении (3) пренебречь влиянием взаимодействия материалов со средой, а также принять равенство:

$$\gamma = V_m 10^6 \Delta \epsilon_{\text{крит}}, \quad (6)$$

где γ – структурно-чувствительный коэффициент; V_m – молярный объем, мм³/моль; $\Delta \epsilon_{\text{крит}}$ – критическая пластическая деформация,

то в результате из (5) получим известное эмпирическое уравнение С.Н. Журкова [12] для оценки долговечности твердых тел

$$t_p = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}\right),$$

где t_p – время до разрушения материала, с; u_0 – энергетический барьер; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – эквивалентное напряжение; R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К; T – абсолютная температура, °С.

Выражение (4) раскрывает физический смысл структурно-чувствительного коэффициента γ , который вначале использовался в кинетических моделях как подгоночный коэффициент, а затем приобрел смысл активационного объема.

Теоретический анализ процесса коррозионного разрушения металлов показывает, что наиболее перспективным является энергетический подход в описании элементарных актов разрушения поверхностей, когда отдельная кинетическая единица находится в поле множества воздействий (тепловых, механических, химических, электрических, магнитных). Скорость коррозионного процесса определяется суперпозицией этих воздействий. Однако практическое обоснование кинетического термофлуктуационного подхода требует экспериментальных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Михайлов Б.Н., Немыкина О.В. Определение эффективной энергии активации коррозионного процесса // Ползуновский вестник. 2009. № 3. С. 135–136.
2. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография. Самара: Самар. гос. техн. ун-т. 2008. 387 с. ISBN 978-5-02-032647-7.
3. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 1. С. 53–62.
4. Dowson D., Progress in Tribology: a Historical Perspective, Plenary Papers of The World Tribology Congress, Bookcraft Limited, Bath, UK, 1997, 300, 3–20.
5. Kerridge M. and Lancaster J.K. The Stages in a Process of Severe Metallic Wear, Proc. Roy. Soc., 1956, A236, 250–264.
6. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.И. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
7. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: справочник. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
8. Кинетика разрушения конструкционных сталей при трении / Ю.Н. Дроздов, Л.М. Рыбакова, И.П. Литвинов, Б.В. Павлик // Трение и износ. 1989. Т. 10. № 5. С. 773–778.
9. Ковшов А.Г. Разработка трибохимических методов расчета и повышения фреттингостойкости деталей турбокомпрессоров из сплавов титана ВТ-9 и ВТЗ-1: дис. ... канд. техн. наук. Киев: Киевский ин-т гражд. авиации, 1988. 20 с.
10. Quinn T.F.J., Oxidational Wear Modelling: Part III – The Effects of Speed and Elevated Temperatures, Abstracts of Papers of The World Tribology Congress, Bookcraft Limited, Bath, UK, 1997, 561.
11. Ибатуллин И.Д. Применение энергетического критерия прочности при анализе кинетики усталостного разрушения поверхностных слоев / Под ред. Н.Б. Демкина // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2006. С. 152–159.
12. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // Физика твердого тела. Т. 22. Вып. 11. С. 3344–3349.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОСНАСТКИ ДЛЯ РАЗРЫВНОЙ МАШИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА В РАМКАХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Покровский А.В., студент

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация
E-mail: alexapokrov@mail.ru*

Представлены результаты процесса изготовления оснастки разрывной машины зарубежного производства с помощью методики реверс-инжиниринга. Описаны процессы сканирования, дополнительных замеров и создания 3D-модели и чертежей для последующего производства литьем и получения новых образцов, которые будут использоваться при экспериментах на данной машине.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, оснастка, 3D-сканирование

MANUFACTURING EQUIPMENT FOR A BLASTING MACHINE USING REVERSE ENGINEERING TECHNOLOGY WITHIN THE FRAMEWORK OF IMPORT SUBSTITUTION

Pokrovsky A.V., student

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation
E-mail: alexapokrov@mail.ru*

The results of the process of manufacturing equipment for a foreign-made tensile testing machine using reverse engineering techniques are presented. The processes of scanning, additional measurements and creation of a 3D model and drawings for subsequent casting production and obtaining new samples that will be used in experiments on this machine are described.

Keywords: reverse engineering, tooling, 3D scanning

В настоящее время остро стоит проблема импортозамещения. В связи с техническими и организационными ограничениями производство некоторого оборудования на территории страны часто оказывается затруднительным, также обслуживание зарубежных станков может обходиться в довольно большие суммы, что вынуждает предприятия искать выгодные пути решения данной проблемы. С развитием аддитивных технологий, а именно технологии реверс-инжиниринга, было найдено решение данной проблемы. Процесс реверс-инжиниринга представляет собой обработку исходных данных об объекте в системах автоматизированного проектирования (САПР), также известных как Computer Aided Design (CAD). Это специальное программное обеспечение для компьютерного проектирования объектов [1]. Применение данной методики позволит компаниям изготавливать оснастку и другие необходимые компоненты на местном уровне. В данной статье рассматривается процесс изготовления оснастки для импортной разрывной машины с использованием методики реверс-инжиниринга, а также дается оценка эффективности этого подхода. Результаты исследования могут быть полезными для предприятий, занимающихся производством специализированного оборудования и инструментов.

Будет рассматриваться разрывная машина европейского образца, а именно один из компонентов – оснастка, которая используется для проведения экспериментов на растяжение/сжатие. Для нее должны быть выдержаны достаточно точные размеры, а также требуется отсутствие каких-либо дефектов на контактной поверхности, так как в случае поломки или

появления повреждений на поверхности ее уже нельзя будет использовать для данных экспериментов, то есть придется закупать новые образцы, что будет очень дорого стоить. Следует учитывать, что мы не имеем чертежей и точной информации о размерах оснастки для машины, поэтому вынуждены прибегнуть к использованию аддитивных технологий для получения точных габаритов детали и воссоздания рабочих чертежей, по которым в будущем можно будет воссоздать точную копию для использования в той же разрывной машине, не прибегая к услугам иностранных компаний.

Путем 3D-сканирования было получено облако точек одной из частей оснастки, сканируемая деталь изображена на фотографии (рис. 1, а). При сканировании используется измерительная рука ROMER ABSOLUTE ARM 7530SI с точностью сканирования $\pm 0,084$ мм, повторяемость точек $\pm 0,03$ [2]. Рабочая зона руки составляет 3 метра, температура измерения 25 °С. Деталь сканировалась несколько раз с небольшой скоростью для получения точных размеров. Далее обрабатываемое облако точек было перенесено в программное обеспечение Geomagic Design X для последующей обработки (рис. 1, б).

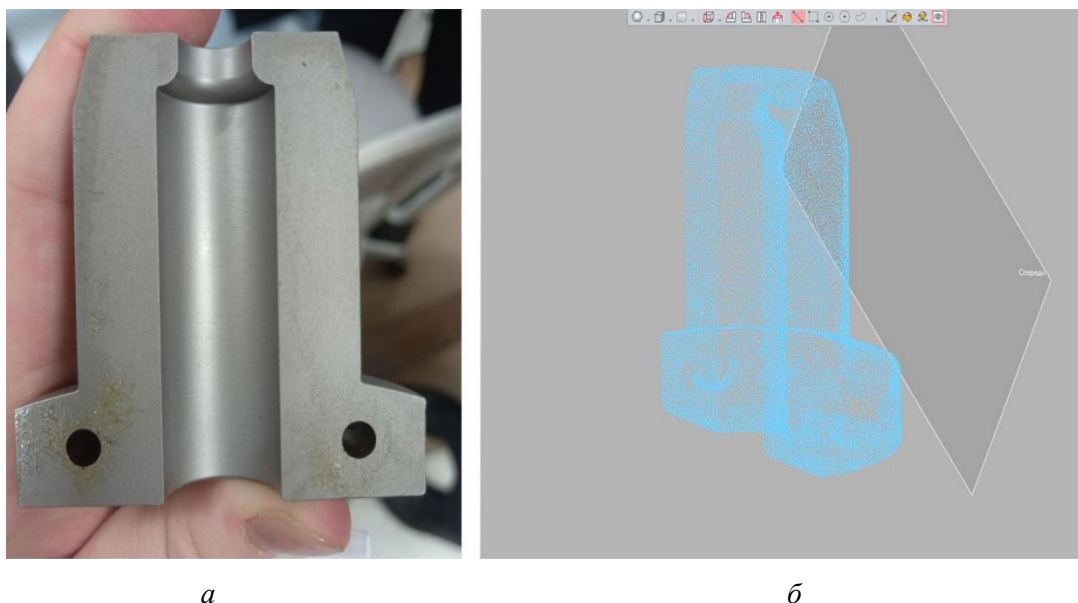


Рис. 1. Рассматриваемая деталь:
а – оснастка, используемая в разрывной машине; б – облако точек, полученное после сканирования в Geomagic Design X

Данное программное обеспечение позволяет выполнить автоматическое разбиение на поверхности, основываясь на облаке точек, и осуществить пользовательские настройки, что позволяет создать группу простых поверхностей, которые мы будем использовать для воссоздания тела сканирования. Это поможет нам получить более точные размеры данной детали [3]. Из-за погрешности сканера и других факторов для точного определения параметров оснастки требуется провести дополнительные измерения, в нашем случае они выполнялись с помощью штангенциркуля и микрометра. Для данной детали нам требуется получить эскиз любого сечения, так как она является деталью вращения, а также вектор, который является осью нашей детали. Ось была взята относительно внутреннего отверстия, так как из-за неточности сканирования на внешней стороне могли образоваться неровности и дефекты, которые сместят ось. Результаты обработки облака точек в Geomagic Design X представлены на рис. 2.

Требуемый эскиз вместе с осью экспортируется в другое программное обеспечение, а именно Siemens NX. В данной программе полученные материалы дорабатываются, уточняются размеры, исправляются углы. С помощью операции вращения получаем тело, где выполняются необходимые технологические отверстия нужных диаметров и расставляются требуемые скругления, после чего 3D-модель оснастки, которая является ее точной цифровой копией, считается готовой (рис. 3). Далее в NX подготавливаются рабочие чертежи,

исходя из которых будет производиться обработка заготовок. Остальные компоненты оснастки будут обрабатываться идентичным способом с применением того же самого программного обеспечения и сканера.

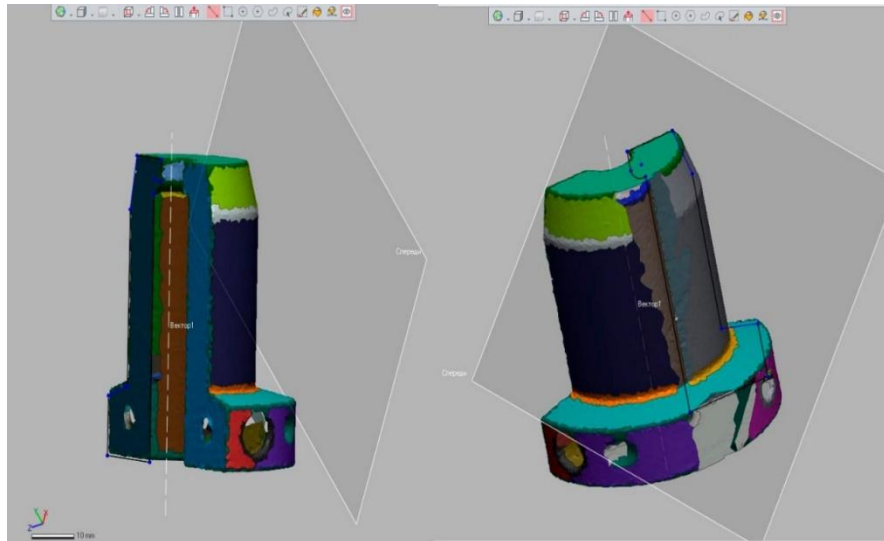


Рис. 2. Результат обработки облака точек в Geomagic Design X

Для проверки полученных размеров перед запуском производства оснастки на местном уровне будет целесообразно сделать тестовый образец, который можно будет «примерить» на самой машине, подогнать отверстия и диаметры, что позволит выявить и исправить ошибки на этапе проектирования. Для этой задачи лучше всего подходит 3D-печать. Напечатанный образец можно доработать прямо на месте и определить неточности в модели, которые могли возникнуть из-за погрешности сканирования или измерения. Далее подбор материала для самих заготовок, из которых и будет производиться оснастка, а именно различных высокопрочных сплавов металлов, зависит от максимальных нагрузок при проведении исследований материала.

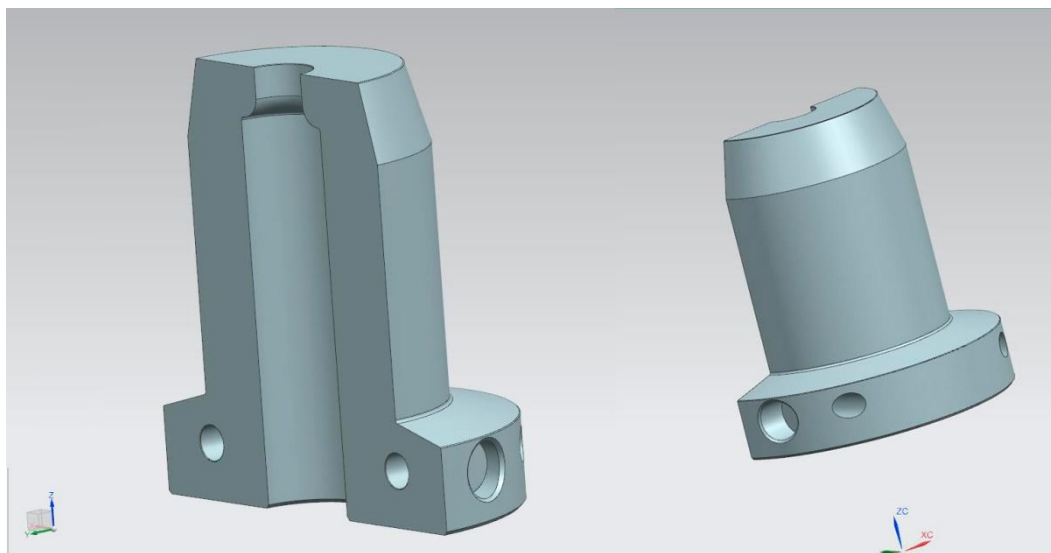


Рис. 3. Готовая 3D-модель

Таким образом, изготовление оснастки для импортной разрывной машины с помощью применения аддитивных технологий представляет собой эффективный способ повышения продуктивности производства и снижения затрат на разработку нового оборудования. Преимуществами данного метода являются возможность быстрого создания конкурентоспособной

оснастки на основе имеющихся образцов, сокращение времени на разработку и экономия на затратах. Однако использование методики реверс-инжиниринга также может столкнуться с определенными проблемами, такими как 1) сложность воспроизведения точных размеров и форм образцов, 2) необходимость в дорогостоящем оборудовании для проведения обратной инженерии, 3) новизна технологии и отсутствие общепринятых методик для данного метода, что не вызывает доверия у крупных предприятий и, как следствие, имеет место нехватка специалистов в данной сфере, что также тормозит развитие и внедрение реверс-инжиниринга [4].

Несмотря на некоторые сложности, перспективы развития и внедрения методики реверс-инжиниринга на отечественных предприятиях для воспроизведения и производства различных видов оборудования и компонентов остаются значительными. Благодаря постоянному развитию технологий можно ожидать улучшения процессов проектирования и производства, что в свою очередь будет способствовать повышению эффективности и конкурентоспособности предприятий в современных условиях рыночной конкуренции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Что такое реверс-инжиниринг // ScanU: [сайт]. 2023. URL: <https://scanu.ru/blog/reverse-engineering/?ysclid=lpfggbvw26853607212> (дата обращения: 23.02.2024).
2. 3D-control measuring systems: официальный сайт. Калуга, 2023. URL: <https://3dcontrol.ru/> (дата обращения: 20.02.2024).
3. Ермаков М.А., Тоньшина А.О. Методика реверс-инжиниринга рабочего колеса центробежного насоса // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Т. 1. Красноярск, 2020. С. 234–236.
4. Зеленко М.А., Попович А.А., Мулытина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: СПбПУ, 2013. С. 200–223.

УДК 62-5

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Проценко М.С. ✉, аспирант, Кутин А.А., д.т.н., профессор

*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва,
Российская Федерация
E-mail: maks.procenko97@mail.ru*

На основе интерактивной компьютерной системы управления (ИКСУ) и модульной технологии сборки детали разработан «Генератор шаблонов допусков», который автоматизирует создание 3D-модели с учетом технических характеристик. С использованием API программы АСКОН КОМПАС-3D инструмент позволяет последовательно задавать параметры изготавливаемой детали и автоматически рассчитывать поля допусков. Предложенный метод позволяет значительно упростить процессы ремонта и обслуживания машин, а также обеспечить требуемую точность и автоматизировать процессы изготовления деталей.

Ключевые слова: цифровой двойник, генератор шаблонов допусков, ремонтное производство, автоматизация, CAD

DEVELOPMENT OF MODELS OF FORMATION OF A DIGITAL TWIN OF PARTS OF A TYPE OF BODIES OF ROTATION AND THEIR TECHNOLOGICAL DESCRIPTION

Protsenko M.S. ✉, PhD student, Kutin A.A., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

*Moscow State Technological University “STANKIN”, Moscow, Russian Federation
E-mail: maks.procenko97@mail.ru*

Based on the Interactive Computer Control System (ICCS) and modular part assembly technology, a “Tolerance Template Generator” has been developed that automates the creation of a 3D model taking into account technical specifications. Using the API of the ASCON KOMPAS-3D program, the tool allows you to consistently set the parameters of the manufactured part and automatically calculate the tolerance fields. The proposed method allows to significantly simplify the processes of repair and maintenance of machines, as well as to ensure the required accuracy and automate the processes of manufacturing parts.

Keywords: digital twin, tolerance pattern generator, repair production, automation, CAD

Эффективность машиностроительных предприятий тесно связана с состоянием их оборудования, подверженного износу из-за интенсивного использования, что делает его ремонт и обслуживание неотъемлемой частью производства. Ремонтные работы часто требуют привлечения высококвалифицированных станочников из-за преимущественного использования универсальных станков с ручным управлением [1]. Современные станки с ЧПУ могли бы упростить этот процесс за счет автоматизации, однако их высокая стоимость и низкий коэффициент загрузки станков в условиях единичного производства делает использование станков с ЧПУ нерентабельным.

Следовательно, перед предприятиями встает задача модернизации производства для увеличения эффективности выпуска продукции небольшими партиями без привлечения дополнительных высококвалифицированных рабочих. Одно из решений – цифровизация универсальных станков с помощью автоматизированных систем контроля перемещения инструмента с опорой на программное обеспечение для имитации и создания цифровых двойников производимых деталей. Это позволяет осуществлять контроль качества на каждом этапе производства в реальном времени без остановок для проверки.

Цифровой двойник (ЦД) – виртуальная копия реального изделия, воспроизводящая его свойства и поведение, находит широкое применение для анализа и улучшения процессов

производства. Цифровые двойки могут использоваться для анализа и оптимизации работы объекта [2–3], а также для прогнозирования результирующего его состояния и сборочных параметров [4]. В контексте ремонтного производства цифровые двойники позволяют непрерывно мониторить процесс обработки деталей, минимизируя потребность в его прерывании для контроля параметров изделия. Данное исследование направлено на разработку методики создания цифровых двойников, включая автоматизацию расчета допусков, для оптимизации ремонтных и производственных процессов.

Моделирование играет ключевую роль в разработке цифровых двойников, требуя создания моделей, соответствующих определенным требованиям. Это исследование фокусируется на компьютерных моделях для деталей тел вращения, подчеркивая важность учета их геометрических характеристик, материалов, последовательности технологических операций, режимов резания и качества получаемых поверхностей. Использование готовых баз данных облегчает выбор необходимых параметров и гарантирует адекватность моделей, уменьшая рутину.

Формирование рассматриваемых моделей предназначено для двух ситуаций:

1. Изготовление детали: цифровой двойник критичен для определения контура обработки с учетом закрепления и допусков и преобразования его в траекторию для станков.
2. Ремонт сборочного узла: задача усложняется необходимостью пересчета размерных цепей, где каждая деталь влияет на конечные размеры, требуя точного подбора полей допусков.

Алгебраические модели помогают в обоих случаях, хотя для второго варианта могут потребоваться дополнительные расчеты или использование метода Монте-Карло для автоматизации части процесса. Это делает имитационные модели сложными как в описании, так и в реализации плагина, но они позволяют эффективно формировать цифровые двойники, применяя компьютерные и алгебраические подходы.

Основываясь на возможностях интерактивных систем управления (ИКСУ), предложен метод создания файла-задания для формирования корректных цифровых двойников деталей с учетом заданных технических характеристик. Методика опирается на модульное конструирование, анализ поверхностей и вычисление полей допусков на обработку (рис. 1).

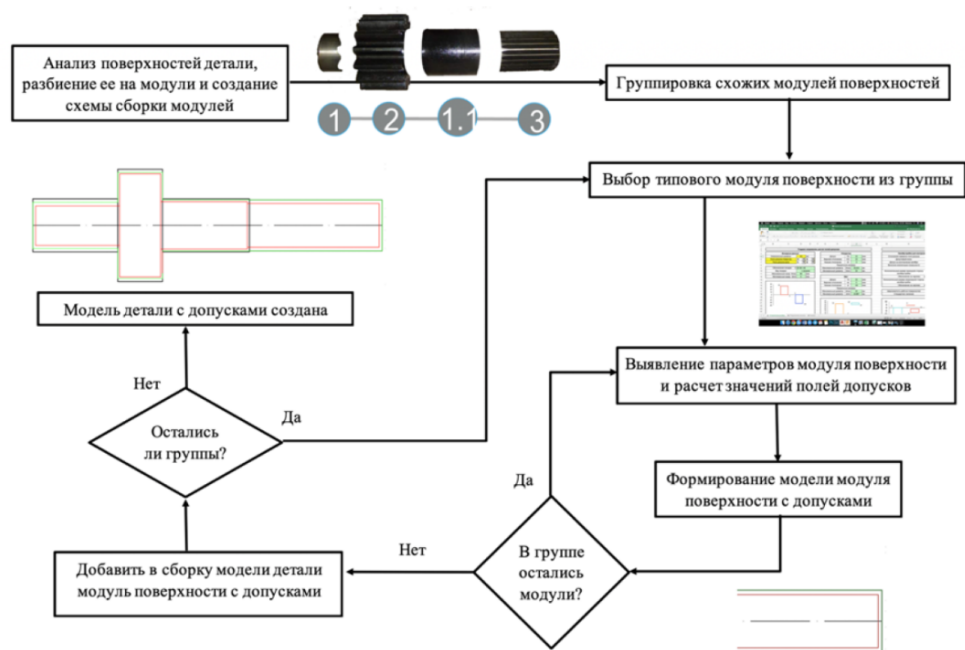


Рис. 1. Алгоритм создания электронной модели детали с допусками

Процесс начинается с детального анализа всех поверхностей детали, разбивки на модули и составления схемы сборки. Следующий шаг – группировка и детализация каждого модуля для расчета допусков с применением стандартных методик. Это позволяет формировать модели с точными допусками, последовательно komponуя их в единую модель детали.

Для эффективного исполнения алгоритма требуется САД-система с API для модульного дизайна. Из доступных программ АСКОН КОМПАС-3D выделяется своей интерактивностью и доступностью создания API, что облегчает процесс. Разработка плагина на базе VBA MS Excel демонстрирует возможность задания параметров для автоматического формирования 3D-моделей и расчета допусков, начиная с выбора типа поверхности (рис. 2).

Этот подход обеспечивает создание эффективной и точной электронной модели детали путем интегрирования модулей в полную сборку с учетом всех технических характеристик и допусков, что упрощает работу оператора и повышает точность проектирования.

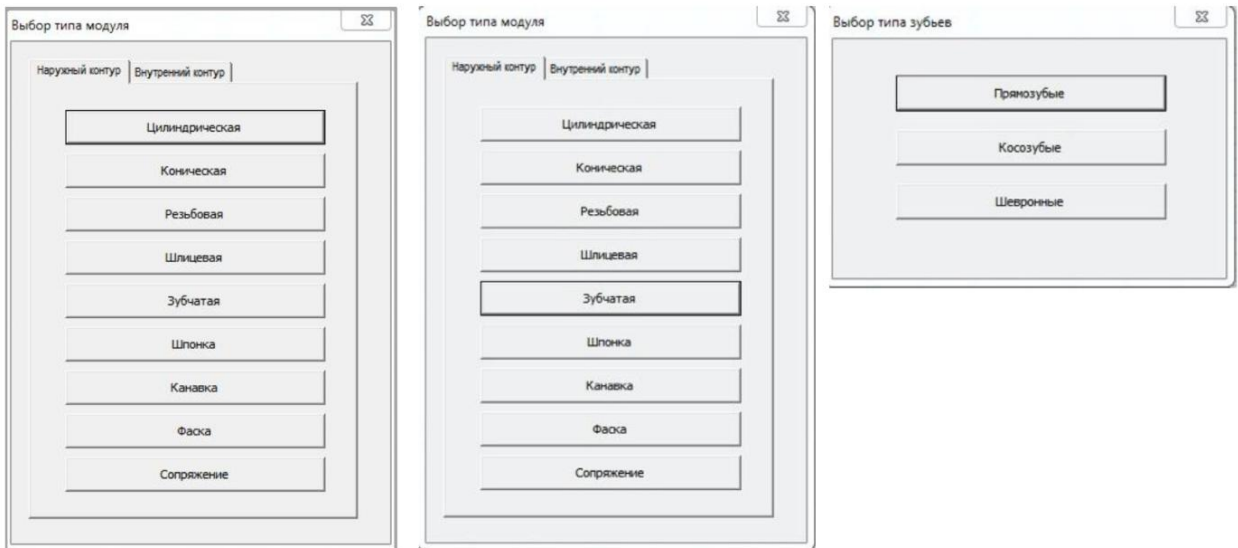


Рис. 2. Примерный вид интерфейса с выбором типа модуля поверхности

После выбора типа модуля устанавливаются специфические параметры, сопровождаемые визуализацией (рис. 3). Этот процесс повторяется для каждой поверхности детали, обеспечивая последовательное формирование ее контура. Завершение этапа сборки отображается в дереве данных, которое демонстрирует все обработанные поверхности с их номинальными размерами (рис. 4).

Работа плагина включает автоматический расчет допусков для каждого выбранного модуля поверхности. Использование открытого API АСКОН КОМПАС-3D способствует эффективной автоматизации проектирования 3D-моделей, включая назначение допусков. Разработка кода поддерживается на языках C#, C++, Basic и Pascal [5], предоставляя гибкость в реализации. Система позволяет точно назначать допуски согласно ГОСТ 2 5 347-82, гарантируя высокий качество точности готовых изделий.

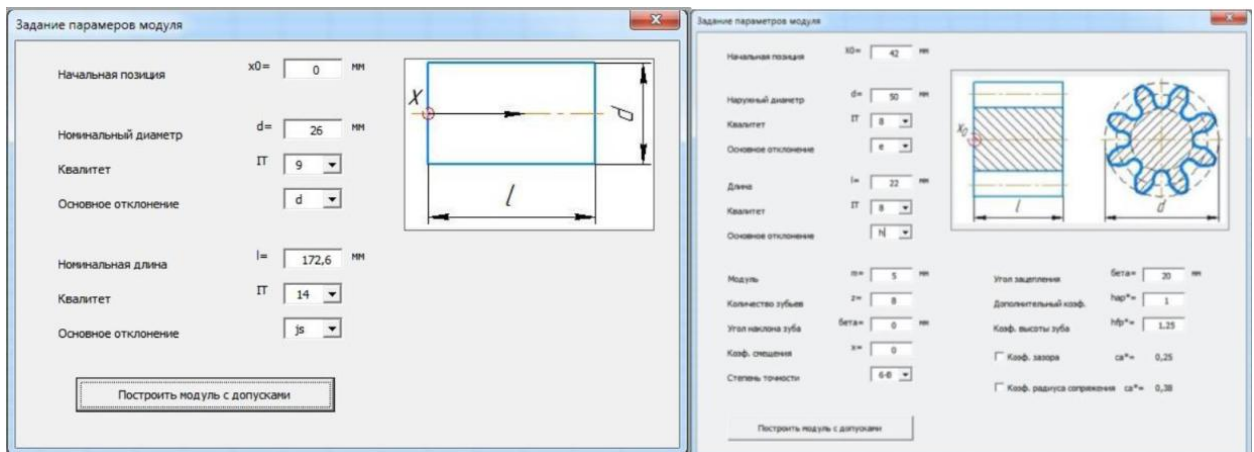


Рис. 3. Примерный вид интерфейса с заданием параметров модуля

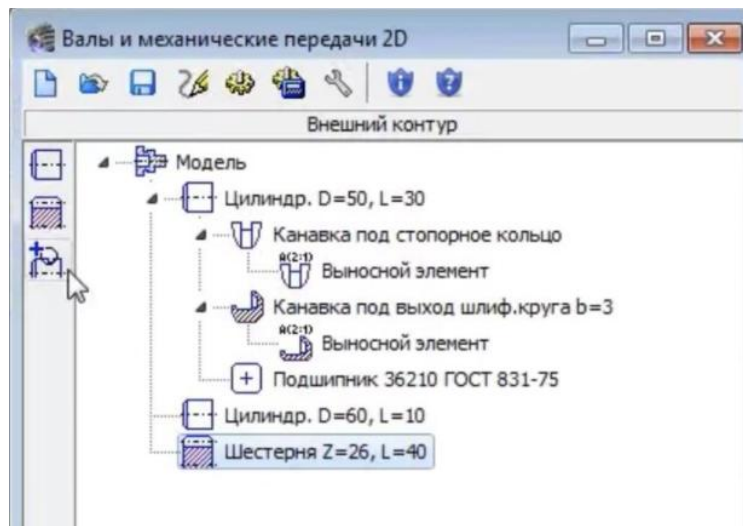


Рис. 4. Валы и механические передачи 2D

Учитывая наличие различных поверхностей деталей, включая цилиндрические, зубчатые и шлицевые, можно с успехом внедрить «Генератор шаблона допусков» для объемных моделей. Это позволяет учитывать специфику каждой поверхности, автоматизируя создание деталей с точными допусками.

По аналогичному принципу процесс построения полей допусков реализуется и на других поверхностях (шлицевая, резьбовая и т. д.).

На следующем этапе модули компоуются в соответствии с конструкцией детали. Параллельно процессу компоновки производится создание параметрической модели в CAD-системе, где в виде параметров используются ранее введенные значения. В результате работы предложенного плагина – «Генератора шаблона допусков» генератор создает электронный шаблон детали с допусками из сгруппированных в единую деталь модулей (рис. 5).

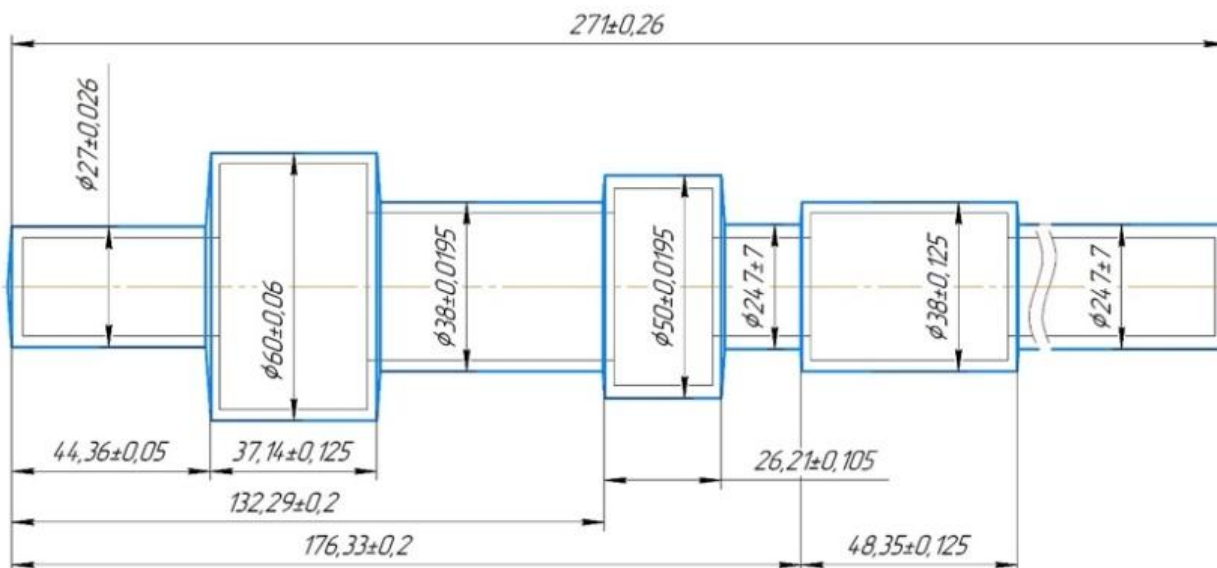


Рис. 5. Результат работы «Генератора шаблона допусков»

На основе возможностей ИКСУ разработан метод для создания файла-задания, облегчающего формирование точных цифровых двойников деталей с учетом спецификаций. Этот подход предлагает удобный интерфейс для определения модулей и их параметров, ускоряя создание точных электронных моделей. «Генератор шаблонов допусков» автоматизирует расчеты допусков, гарантируя точность и соответствие стандартам. Основные этапы алгоритма демонстрируются на рис. 6, подчеркивая простоту и эффективность процесса.



Рис. 6. Алгоритм работы модуля

Цифровизация изготовления деталей выделяет плагин, повышая производственную эффективность и качество продукции, снижая время производства и риск брака. Операторы получают мощный инструмент для управления процессами, а цифровые двойники обретают повышенную точность и надежность. Этот подход к электронному заданию является значительным шагом в области автоматизации и цифровизации, оптимизируя подготовку данных и улучшая оперативное принятие решений, особенно в ремонтном производстве.

В результате исследования был разработан алгоритм для создания цифровых двойников деталей, целью которого является улучшение процессов на станках с ручным управлением в ремонтном производстве. Основным инструментом служит «Генератор шаблонов допусков», который автоматизирует расчеты параметров для разных поверхностей деталей, обеспечивая эффективность и точность цифрового двойника. Методика включает в себя использование интерактивных систем управления и модульного подхода к сборке деталей с поддержкой API от АСКОН КОМПАС-3D, предлагая новые возможности для оптимизации ремонтных процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Островский М.С, Радкевич Я.М., Тимирязев В.А. Критерии и управления техническим состоянием машин // Горные машины. Автоматика. 2004. № 6. С. 40–42.
2. Kokorev D.S., Yurin A.A. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloquium-journal / Technical Science. No. 10 (34). 2019. Pp. 31–35. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10264.
3. Söderberg R. et al. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // CIRP Annals. 2017. Т. 66. № 1. С. 137–140.
4. Modeling of 2D and 3D assemblies taking into account form errors of plane surfaces / S. Samper, P-A. Adragna, H. Favreliere, M. Pillet // J Comput Inf Sci Eng. 2009. Vol. 9. No. 2. Pp. 1–12. DOI: 10.1115/1.3249575.
5. Щёкин А.В. Автоматизация получения параметров детали для задач конструкторско-технологической параметризации // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 3. С. 345–365. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.345-365>

МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ 3D-МОДЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ API КОМПАС-3D

Сёмин А.С., магистрант

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет,
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: siomin.artiom@mail.ru*

Представлены результаты оптимизации создания параметризованных 3D-моделей деталей авторской мебели с использованием API КОМПАС-3D. Благодаря параметризации через пользовательский интерфейс модуля конструктор может осуществлять изменение и создание новых сборок за меньший промежуток времени и оптимизировать работу над новым проектом, уделяя больше внимания чертежам.

Ключевые слова: КОМПАС-3D, авторская мебель, параметризация, API

FOR PARAMETRIZATION OF 3D MODELS USING KOMPAS-3D API

Semin A.S., Master's Degree student

*Moscow aviation institute (national research university) Moscow, Russian Federation
E-mail: siomin.artiom@mail.ru*

The results of optimization of the creation of parameterized 3D-models of designer furniture parts using the KOMPAS-3D API are presented. Thanks to parameterization through the module's user interface, the designer can change and create new assemblies in less time and optimize work on a new project, paying more attention to drawings.

Keywords: KOMPAS-3D, designer furniture, parameterization, API

Целью научно-исследовательской работы является упрощение взаимодействия с 3D-сборками конструктора мебели. Нередко появляется необходимость даже в авторской мебели повторять заказ для другого заказчика или вносить правки в старые проекты, выполненные старшим коллегой. Из-за вышеперечисленных аспектов процесс работы над моделями растягивается и занимает больше времени, чем хотелось бы.

Для решения указанных проблем началась разработка модуля по параметризации авторской мебели с помощью API КОМПАС-3D. Задача данного модуля заключается в изменении готовых сборок в соответствии с введенными параметрами пользователем. Модуль также осуществляет вывод спецификации с размерами деталей для ознакомления с новыми габаритами и расчет фурнитуры. Таким образом, были поставлены следующие цели:

- создать сборки в КОМПАС-3D на примере реальных проектов;
- провести параметризацию данных сборок;
- сделать вывод документа спецификации с габаритами деталей;
- рассчитать необходимое количество фурнитуры под сборку с введенными пользователем параметрами и вывести ее в документ спецификации.

Прежде чем приступить к разработке приложения по параметризации мебели через КОМПАС API, необходимо создать 3D-детали сборки [1], собрать ее, запараметризовать через КОМПАС-3D с назначением внешних переменных и только после приступить к разработке приложения на WinForms. Пример создания одной из деталей сборки «Шкаф» (рис. 1).

Также для научно-исследовательской работы были созданы следующие сборки с индивидуальными параметрами: «Секционный шкаф» (рис. 2), «Подвесной шкаф», «Стол», комплект параметризованной фурнитуры из следующих деталей: шкант калиброванный, шкант плоский, полкодержатель, эксцентрик, шток эксцентрика, скрытый мебельный навес, планка для навесов, планка для навесов противоположная, заглушка для навесов,

опора регулируемая со штифтами, накладная петля, прямая ответная планка, ручка, конфирмат, профиль 1009 для LED подсветки, профиль рассеиватель для LED подсветки.

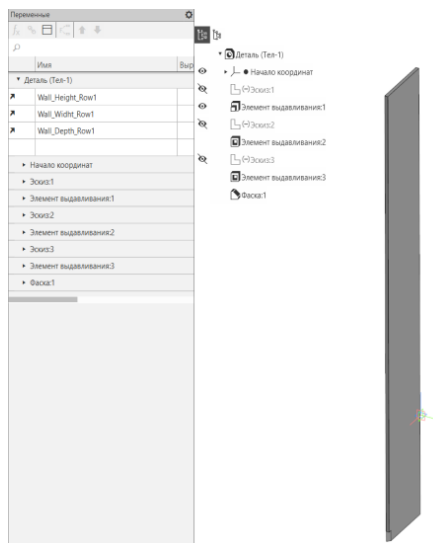


Рис. 1. Деталь сборки «Шкаф» с назначенными параметрами

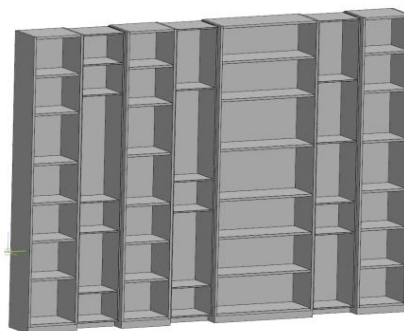


Рис. 2. Сборка «Шкаф»

Метод внутренней параметризации хорошо работает с уже созданной 3D-моделью или сборкой, что позволяет не делать их кодом с нуля. Для изменения деталей или сопряжений необходимо правильно обратиться к нужному параметру и присвоить ему новое значение.

Одним из главных достоинств данного метода является простота в использовании. Так, при правильном оформлении названий становится возможным быстро обнаружить ошибку в параметрах сборки и коде, так как все значения могут быть найдены во вкладке соответствующей детали. Кроме того, разработчику нужно лишь изменять заданные значения, а не выполнять команды отрисовки эскиза для построения деталей. Возможность использования метода без необходимости глубоких знаний API облегчает его применение, но при этом во время моделирования нужно создавать привязки переменных к размерам, чтобы была возможность для обращения к ним с помощью кода.

Главной проблемой данного метода является объем кода при крупных сборках, к тому же затрудняется поиск ошибок при неверной сборке, так как приходится искать ее и в коде, и привязках КОМПАСа. Необходимость создавать детали вручную тоже становится проблемой, так как их нужно где-то хранить. Соответственно, перед началом работы программы необходимо загрузить модель или установить библиотеку, которая их содержит.

Для работы Visual Studio с КОМПАС-3D необходимо подключить библиотеки [2]: Kompas6API5, Kompas6Constants3D, Kompas6Constants, KompasAPI7 (рис. 3). Данные библиотеки нужны, чтобы Visual Studio мог принимать параметры, созданные в КОМПАС-3D. Также приведен пример назначения новых переменных деталям [3] (рис. 4).

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using Kompas6API5;
using Kompas6Constants;
using Kompas6Constants3D;
using System.Runtime.InteropServices;
using KompasAPI7;

```

Рис. 3. Подключение библиотек

```

//////////Глубина шкафчика

ksVariable V_LS = varcoll.GetByName("V_LS", true, true);
V_LS.value = set_VLS;
ksVariable T_PS = varcoll.GetByName("T_PS", true, true);
T_PS.value = set_VLS;
ksVariable G_NK = varcoll.GetByName("G_NK", true, true);
G_NK.value = set_VLS;
ksVariable T_VK = varcoll.GetByName("T_VK", true, true);
T_VK.value = set_VLS;

```

Рис. 4. Обработка параметров детали

Для более наглядного изменения параметров и для того, чтобы пользователю не пришлось запоминать все введенные значения, API создает аннотационные размеры на 3D-модели.

Также создается спецификация с размерами деталей и подсчетом необходимого количества фурнитуры для сборки мебели [4].

Проведенная работа позволяет сделать вывод о том, что параметризация внутренним методом дает возможность быстро подготавливать сборки к изменениям, что дает возможность создавать новые представления. Однако стоит отметить, что выбор метода параметризации всегда нужно делать на основании комплексности сборки. Так, крупные проекты следует чередовать между отрисовкой эскиза с нуля или заданием новых параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Никонов, В.В. КОМПАС-3D: Создание моделей и 3D-печать: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2020. 208 с.
2. Сергей Кузьмин: [канал пользователя] // Youtube [видеохостинг]. URL: <https://www.youtube.com/@kzs64/playlists> (дата обращения: 12.10.2022).
3. Сергей Алмазов: [канал пользователя] // Youtube [видеохостинг]. URL: <https://www.youtube.com/@user-dz3mc2x14b/videos> (дата обращения: 14.10.2022).
4. Форум пользователей ПО АСКОН / [Электронный ресурс] // КОМПАС-3D [сайт]. М., 2010–2023. URL: <https://forum.ascon.ru/index.php> (дата обращения: 14.09.2022).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРОБЕУДАРНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ: КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РАБОТ


Строкач Е.А. , к.т.н., ведущий инженер, Пожидаев А.А., ассистент

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: evgenij.strokatsch@mai.ru*

Представлен краткий обзор современных публикаций по моделированию дробеударного формообразования FEA-методами. Показана высокая заинтересованность в данной тематике за рубежом и применение различных подходов к моделированию. Отмечается частое применение сопряженного DEM-FEM подхода, использование упругопластической модели Джонсона – Кука для обрабатываемых образцов. Отмечается важность дальнейших работ по моделированию и верификации методик моделирования процесса дробеударного формообразования длинномерных образцов.

Ключевые слова: дробеударное формообразование, пластическая деформация, finite element analysis

SHOT PEEN FORMING SIMULATION: A SHORT REVIEW OF RECENT PUBLICATIONS

Strokach E.A. , PhD in Engineering Sciences, leading engineer,
Pozhidaev A.A., assistant

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation
E-mail: evgenij.strokatsch@mai.ru*

A short review of recent advances in the simulation of shot peen forming is presented. High interest and implementation of different simulation strategies is observed abroad. Frequent use of combined DEM-FEM approach is noted as well as application of Johnson-Cook elastoplastic model for peened samples. High importance of future developments of simulation methodologies and their experimental verification is mentioned in terms of high-length samples shot peen forming

Keywords: shot peen forming, plastic deformation, finite element analysis

Прогнозирование состояния поверхности и формы длинномерных деталей после дробеударного формообразования (ДФ) требует детального изучения картины пластических деформаций в поверхностном слое. FEA и SPH-подобные методы моделирования на микроуровне позволяют подробно рассмотреть эти процессы, что расширило их применение в этой связи и верификацию на образцах разного типа в последние годы. За рубежом выделяется группа по моделированию дробеударного формообразования из Монреальского политехнического университета. Недавняя диссертация Р. Fauchaux [1] посвящена методике моделирования на основе концепции собственных деформаций, предложенной в 1987 г. Т. Мура [2] и теоретически оформленной А.М. Корсунским [3–7].

Концепция состоит в разделении полных деформаций на упругие и собственные, которые включают в себя деформации, произведенные разными явлениями – температурные, пластические деформации, другие объемные деформации, которые могли бы происходить в зависимости от условий эксперимента. В случае дробеударной обработки это, в основном, только пластические деформации, что позволяет переформулировать задачу через определение и использование собственных деформаций. В отличие от остаточных напряжений (ОН), которые часто применяются для задания условий расчета, собственные деформации, в нашем случае пластические, описывают поведение материала в малой локальной области и одинаковы для разных положений точки контакта (для одного и того же образца). Кроме

того, часто получаемые остаточные напряжения являются несбалансированными и постоянно перераспределяются в материале. Автор отметил малую базу данных экспериментов по ДФ, а доступные работы часто предполагают применение малых (76×19 мм) образцов. Для верификации использовались листы 2024-T3 4,9 мм на дробеструйном стенде фирмы Canablast с соплом 12,7 мм и скоростью дробы 41 м/с. Верифицированную методику удалось расширить до применения на длинномерных деталях и подтвердить соответствующим экспериментом – на 10 листах 1016 мм длиной и 26 образцов 508x127 мм.

Работа Faucheux во многом использовала наработки диссертации Gariépy (2012) [8]. Предварительное экспериментальное уточнение свойств сплава 2024-T3/T351 позволило перейти к относительно масштабным моделям через задание начальных распределений несбалансированных остаточных напряжений после обработки. Было показано, что направление прокатки листов и плит существенно влияет на напряжение и деформированную форму детали, что желательно учитывать в начальных условиях. Моделирование и эксперименты проводились для образцов размером 76×19 (76) \times 1.6 мм с использованием керамической и стальной дробы Z425.

Известны многие другие публикации по моделированию ДФ. В работе [9] для моделирования обработки сплава YLI2CZ применялся пакет ANSYS/LS-DYNA, где на основе только упругих свойств удалось определить зависимости ОН и других параметров поверхностного слоя от условий обработки. Wagner [10] моделировал в пакете MSC формообразование авиационных панелей с использованием переноса поля ОН с малых образцов на длинномерные. Корр и Schulz [11] моделировали с помощью ANSYS/LS-DYNA двустороннее ДФ. Используемый диаметр дробы – 6.4 и 4 мм, материал образца – AlMg3. Laspalas и др. [12] также сначала построили методику моделирования на единичных и многочисленных ударах дробы о малый образец, а затем перешли к авиационным панелям. С применением упруго-пластичной модели Джонсона – Кука с изотропным упрочнением при учете трения моделью Coulomb с коэффициентом 0.47 авторам удалось получить разницу по диаметру кратера не более 5 %. Можно также отметить работы Miao, Perron и Levesque [13], Kang, Wang и Platts [14], Wang и др. [15], в которых с помощью Abaqus Explicit и LS-DYNA на образцах из стали и алюминиевых сплавов апробировались модели единичного и многократных контактов дробы с поверхностью. Показано, что более точное моделирование НДС после обработки требует учета многократных воздействий дробы. В работе [13] показано, что 96 ударов дробы по пластине Альмена при моделировании позволяют достичь полного насыщения по интенсивности обработки поверхности. Во многих работах, в т. ч. Bhuvaraghan V. и др. [16], рассматривается сопряженный DEM-FEM подход, когда движение дробы моделируется абсолютно жесткими дискретными элементами в DEM, а контактные силы и их положения передаются в FEM-расчет. В их расчетах применялся Abaqus Explicit, материал дробы – SAE1070 образца Inco718, а упругопластические свойства учтены моделью Johnson – Cook. Авторам удалось добиться высокой точности результатов за счет корректно выбранных свойств материалов и соответствующих коэффициентов, описывающих сохранение энергии при отражении дробинки и относительно невысокой ресурсоемкости за счет двухступенчатого DEM-FEM-подхода и одномоментного приложения нагрузок в FEM-моделировании.

В работе Li, Dong, Luo & Huang Li и др. [17] изучалось влияние дробеударной обработки перед формообразованием на рост усталостных трещин в сплаве 2024-T351. Авторы получили результаты, согласно которым, несмотря на образование трещин, в основном в областях, где отсутствуют кратеры ударов дробы и раннее трещинообразование происходит быстрее, скорость роста трещины остается почти такой же, как при механообработке. Chen и др. [18] с помощью Abaqus Explicit моделировали обработку образца из SAE1070 (с упругопластическими свойствами по модели Johnson – Cook) стальной дробью. Кроме прочего, интересным является влияние скорости дробы на шероховатость – при ее росте с 20 до 60 м/с шероховатость увеличивается в 4 раза. Модель Johnson – Cook применялась и в работе [19] при моделировании обработки 2024-T351, где приведены данные по влиянию количества ударов дробы на глубину кратера. При случайно расположенных контактах дробинки средний

диаметр кратера снижается с увеличением покрытия обработки. Когда покрытие достигает 90 %, глубина напряжений сжатия становится равной значению напряжений для двух последовательных ударов дроби в одну область.

Стоит отметить, что упругопластическая модель Johnson – Cook используется в 90 % современных работ для задания свойств образца при моделировании ДФ. Часто дробь принимают абсолютно жесткой, что допустимо, так как не подразумевается ее существенная деформация в процессе обработки. Также сопряженный DEM-FEM-подход получил широкое распространение благодаря возможности сократить общее расчетное время и обеспечить допустимую точность.

Среди отечественных публикаций по моделированию ДФ выделяется группа из ИР-НИТУ. Например, работа А.Е. Пашкова и коллег [20] посвящена моделированию начальных напряжений при обработке дробию из стали в LS-DYNA. Предложенный подход также был двухступенчатым – полученные напряжения в приповерхностном слое переносились в другую модель для определения деформаций. При верификации на экспериментах по критерию стрелы прогиба пластины расхождение составило не более 10 %. Многие интересные результаты исследований этой группы вошли в недавние диссертации О.В. Самойленко и А.А. Пашкова [21–22]. Для решения нескольких разных задач с помощью Ansys/LS-DYNA моделировалось ДФ и формирование НДС деталей на основе как единичного контакта, так и множественного контакта дробинок с образцами. Очевидно, что дальнейшее развитие производства длинномерных деталей для любой машиностроительной отрасли потребует отработки вопроса проектирования процесса ДФ (предварительного выбора режимов, допустимых размеров дроби и образцов и т. п.) с учетом требуемого остаточного НДС, и наличие корректной и малозатратной методологии моделирования является критически важным. Требуется проведение дальнейших работ по моделированию и верификации разрабатываемых методик в области ДФ.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, тема FSFF-2023-0006.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Faucheux P. (2019). Simulating Shot Peen Forming with Eigenstrains [Ph.D. thesis, Polytechnique Montréal].
2. Mura T. Micromechanics of defects in solids. Number 3 in Mechanics of Elastic and Inelastic Solids. Springer Netherlands, 2 edition. 1987.
3. Korsunsky A.M. On the modelling of residual stresses due to surface peening using eigenstrain distributions // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 40 (8). 2005. Pp. 817–824.
4. Korsunsky A.M. Residual elastic strain due to laser shock peening: modelling by eigenstrain distribution // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 41 (3). 2006. Pp. 195–204.
5. Korsunsky A.M. Eigenstrain analysis of residual strains and stresses // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 44 (1). 2009. Pp. 29–43.
6. Korsunsky A.M., Regino G. and Nowell D. Variational determination of eigenstrain sources of residual stress // In Proceeding of the 2004 international conference on computational and experimental engineering and sciences, 2004. Madeira, Portugal.
7. Korsunsky A.A. Teaching essay on residual stresses and eigenstrains. Butterworth Heinemann, Boston, MA, 1st edition edition, 2017.
8. Gariépy A. (2012). Finite Element Modelling of Shot Peening and Peen Forming Processes and Characterisation of Peened AA2024-T351 Aluminium Alloy [Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal].
9. Zeng Y. Finite Element Simulation of Shot Peen Forming. Shot Peening, 2003, L. Wagner (Ed.). <https://doi.org/10.1002/3527606580.ch71>
10. Wagner J.M., Jr. (2013). A hybrid finite element analysis of shot peen contour forming using residual stress measurements [Master thesis, Wichita State University].
11. Kopp R. and Schulz J. Optimising the Double-Sided Simultaneous Shot Peen Forming. Shot Peening, 2003, L. Wagner (Ed.). <https://doi.org/10.1002/3527606580.ch30>

12. Lasपालas M., Gomez J., Escalera F., Sánchez R., Jiménez M.A. Simulation of Peen Forming Process of Aluminum Aeronautic Panel // Simulia customer conference. Barcelona 2011. Conference proceedings OCLC 733556791. Pp. 87–102.
13. Miao H.Y., Perron C., & Lévesque M. Finite element simulation of shot peening and stress peen forming [Paper] // 10th International Conference on Shot Peening, 2008, September, Tokyo, Japan.
14. Kang X, Wang T, Platts J. Multiple impact modelling for shot peening and peen forming // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2010, 224(5). Pp. 689-697. DOI: 10.1243/09544054JEM1672.
15. Wang C., Li W., Jiang J., Chao X., Zeng W., Xu J., Yang J. An Improved Approach to Direct Simulation of an Actual Almen Shot Peening Intensity Test with a Large Number of Shots. *Materials*, 2020, 13, 5088. <https://doi.org/10.3390/ma13225088>
16. Bhuvargarhan B., Srinivasan Sivakumar M., Maffeo B., McCLain Robert D., Potdar Y., Prakash Om. Shot peening simulation using discrete and finite element methods. *Advances in Engineering Software*, vol. 41, issue 12, 2010. Pp. 1266–1276. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.09.003>
17. Li G., Dong Z., Luo T. et al. Study on the influence of shot peening strengthening before shot peen forming on 2024-T351 aluminum alloy fatigue crack growth rate. *Sci Rep* 13, 5313, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32616-2>
18. Chen K., Wu J., Lin Q. et al. Effects of shot peening velocity and coverage on peen forming. PREPRINT (Version 1) available at Research Square. 26 May 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1656095/v1>
19. Xiao X., Tong X., Liu Y., Zhao R., Gao G., Li Y. Prediction of shot peen forming effects with single and repeated impacts. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 137. 2018. Pp. 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.01.006>
20. Пашков А.Е., Пашков А.А., Самойленко О.В. Исследование начальных напряжений процесса обработки дробью // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. № 4. С. 120–128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-120-128>
21. Самойленко О.В. Обеспечение точности формы малоожестких деталей типа пластин с подкреплением, упрочняемых дробью с превентивным деформированием: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.6. Иркутск, 2023. URL: <https://www.istu.edu/upload/iblock/533/t9g5rafjulqe5wruccik5r53d92q0a/Tekst-dissertatsii.pdf>
22. Пашков А.А. Совершенствование процесса формообразования листовых деталей двойной кривизны на дробеметных установках контактного типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Иркутск, 2023.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛА ТЕПЛООБМЕНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Суханов Д.С., студент

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

Рассматриваются преимущества применения тепловых отопителей, повышающих комфорт в кабине или салоне автомобиля, по сравнению с применением штатных зимних пакетов. Описываются такие характеристики тепловых отопителей, как возможность автономной работы и малое энергопотребление, позволяющее сэкономить топливо. Проводится сравнение отопителей. Представлено исследование характеристик с помощью 3D-моделирования.

Ключевые слова: тепловые отопители, автономная работа отопителя, повышение комфорта, малое энергопотребление, исследование характеристик, сравнение отопителей

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF HEAT EXCHANGE UNIT OF CAR HEATERS USING 3D MODELING

Sukhanov D.S., student

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

The advantages of using thermal heaters, which increase comfort in the cabin or interior of the car, compared to the use of standard winter packages, are considered. The characteristics of thermal heaters are described, such as the possibility of autonomous operation and low energy consumption, which allows saving fuel. A comparison of heaters is carried out. A performance study using 3D modeling is presented.

Keywords: thermal heaters, autonomous operation of the heater, increased comfort, low energy consumption, characteristics study, comparison of heaters

Современную жизнь без автомобилей трудно представить. Они стали неотъемлемой частью нашей повседневной жизни, обеспечивая нам удобство и свободу передвижения. Так как территория нашей страны находится в зонах с умеренным и холодным (УХЛ) климатом, автомобиль без системы отопления невозможно эксплуатировать. Все стандартные компоненты автомобиля в большей или меньшей степени зависят от работоспособности двигателя. Это означает, что они могут функционировать только при работе двигателя автомобиля. Это отопитель салона, подогрев сидений – как передних, так и задних, обогрев лобового и заднего стекла. На современном рынке существуют автономные агрегаты, такие, например, как автомобильные отопители. Основные отечественные производители – это Шадринский завод АО «ШААЗ» и Самарский ООО «Адверс», зарубежные Eberspacher и Webasto [1]. Они обладают относительно малым расходом топлива: так, например, расход топлива у легкового автомобиля на холостом ходу в среднем составляет 0,55–0,75 л/ч, а у автономного отопителя 0,14–0,26 л/ч. Отопители, выпускаемые этими компаниями, имеют схожие эксплуатационные характеристики. При проектировании, изготовлении, а также исследованиях характеристик отопителей применяются 3D-технологии. Пример трехмерных моделей основных деталей отопителя приведен на рис. 1, 2, 3.

При сгорании топлива образуются разогретые газы [2], которые, перемещаясь в выхлопную трубу, по пути нагревают стенки теплообменника, а от стенок теплообменника нагреваются радиаторы [3]. Теплообменник охлаждается воздухом, который попадает

вентилятор, и именно этот разогретый воздух подается в автомобиль. У Eberspacher и Webasto (см. рис. 1 и 2) теплообменник – это одна деталь, она же нагревается и охлаждается, а у «Адверс» (см. рис. 3) это две разные детали – теплообменник и радиатор, поэтому количество выделяемого тепла зависит от плотности прилегания поверхности натяжения теплообменника к радиатору.

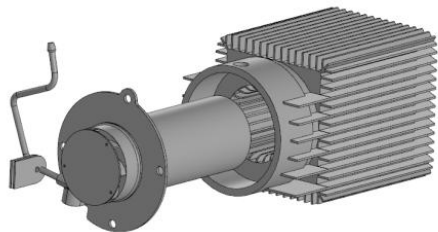


Рис. 1. Основной узел отопителя Eberspacher: камера сгорания и теплообменник

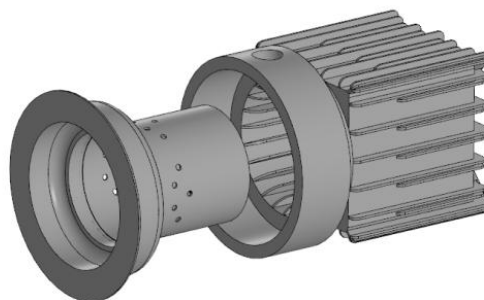


Рис. 2. Основной узел отопителя Webasto: камера сгорания и теплообменник

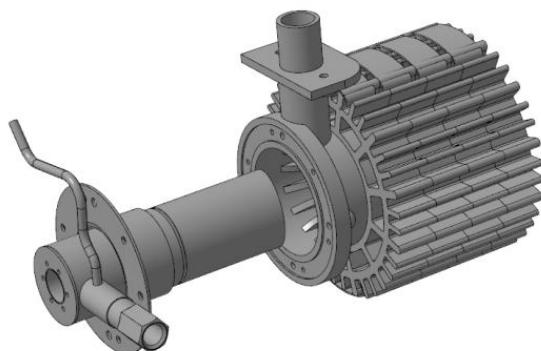


Рис. 3. Основной узел отопителя Адверс: камера сгорания, теплообменник и радиаторы

Легковые автомобили, укомплектованные отопителями, позволяют экономить топливо и, как следствие, улучшают экологию. Применяя современные цифровые технологии, производители отопителей постоянно совершенствуют их конструкцию [4].

Определить площадь криволинейных поверхностей достаточно сложно. 3D-модель позволяет с помощью команды МЦХ (массо-центровочные характеристики) определить это одним кликом мыши. Пример МЦХ 3D-модели основного узла отопителя «Адверс» представлен на рис. 4.

МЦХ модели

Сборка

Масса	M = 6091.744987 г
Площадь	S = 374701.881155 мм ²
Объем	V = 778995.522691 мм ³
Центр масс	Xc = 2.588434 мм
	Yc = -0.001274 мм
	Zc = -74.631045 мм

Рис. 4. МЦХ 3D-модели основного узла отопителя

Гистограмма площади участка газов и воздуха, созданная с помощью 3D-моделей основных узлов теплообмена, представлена на рис. 5.

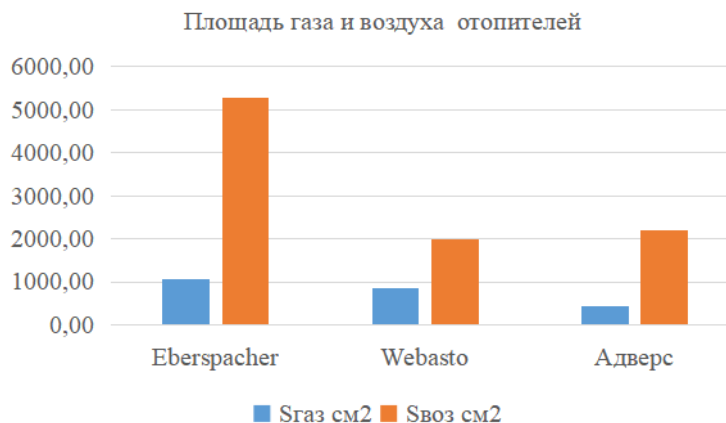


Рис. 5. Гистограмма

Как видно на гистограмме (см. рис. 4), у «Адверса» самая малая площадь газов, поскольку у данного отопителя теплообменник и радиаторы – это две разные части. Такая конструкция упрощает технологию изготовления, но из-за этого уменьшается количество выделяемого тепла, а следовательно, теряется эффективность всего отопителя.

Таким образом, для повышения эффективности необходимо изготавливать теплообменник и радиатор одной деталью, а не сборкой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Родионов В.А. Моделирование конструкции автомобильного отопителя // Высокие технологии в машиностроении: матер. всерос. науч.-техн. конференции. Самара, 2023. 54–56 с.
2. Носов Н.В., Родионов В.А. Конструкция и принцип работы теплообменника отопителя «Планар 4Д–24»: метод. указ. к лаб. работе. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 27 с.
3. Родионов В.А., Родионова О.В., Ахметов Е.Ю. Разработка конструкции теплообменника воздушного отопителя // Высокие технологии в машиностроении: матер. всерос. науч.-техн. конференции. Самара, 2013. С. 55–58.
4. Родионов В.А., Солодова Н.О. Оптимизация конструкции радиатора автомобильного воздушного отопителя // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара, 2018. Т. 20. № 4 (2). С. 293–296.

МОДЕЛИРОВАНИЕ «ДЕКОРАТИВНОЙ ПОЛКИ» В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Тен А.Ю., студент, Родионов В.А., ст. преподаватель

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: lika.ten.00@bk.ru*

Разработана 3D-модель декоративной полки в китайском стиле с использованием систем автоматизированного проектирования, выполнен рендер декоративной полки в программе SolidWorks, назначен материал изделия. С учетом геометрических особенностей изделия «декоративная полка» выбран способ обработки на фрезерно-гравировальном станке с числовым программным управлением.

Ключевые слова: декоративная полка, обработка изделия, способ изготовления, эскиз, материал

DEVELOPMENT OF A 3D MODEL OF THE “DECORATIVE SHELF” PRODUCT

Ten A.Yu., student, Rodionov V.A., senior lecturer

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: lika.ten.00@bk.ru*

A 3D model of a decorative shelf in Chinese style was developed using computer-aided design systems, a decorative shelf was rendered in the SolidWorks program, the product material was assigned, taking into account the geometric features of the decorative shelf product, a processing method was selected on a numerically controlled milling and engraving machine.

Keywords: decorative shelf, product processing, manufacturing method, sketch, material

Часто при обустройстве комнаты мы не можем найти подходящее место для какого-либо предмета. В этой проблеме нам может помочь полка для хранения вещей. Она позволяет не только сэкономить пространство в доме, но и подчеркнуть дизайн, а комнате придать уют и гармоничность. Полки настенные используются для декора офисов, любых комнат жилых домов, магазинов и т. д. На них удобно хранить фоторамки, бижутерию, книги, журналы и другие мелочи. В настоящее время полки – неотъемлемая часть каждого жилища, потому как она может украсить любой интерьер.

Традиционный китайский стиль интерьера – это одно из направлений, которое популярно во многих странах. За свою утонченность и экзотику у него появляется все больше поклонников. Так как этот стиль набирает популярность, мы также решили разработать настенную декоративную полку в подобной манере.

Для моделирования настенной полки используется программа SolidWorks. Данное программное обеспечение обладает достаточным функционалом, который необходим нам при разработке модели. SolidWorks имеет следующие преимущества: продуманный программный интерфейс пользователя; наличие библиотеки Toolbox с моделями по стандарту ГОСТ; направленность как на конструкторскую, так и на технологическую подготовку производства; как распознавание, так и параметризацию импортированной геометрии. В этой системе автоматизированного проектирования было создано несколько деталей, которые позже собираются в одну сборку (рис. 1, 2).

В качестве материала для декоративной полки была назначена древесина. Она была выбрана по нескольким причинам. Во-первых, древесина легко обрабатывается, что позволяет создать различные формы и узоры на поверхности полки. Во-вторых, она не выделяет вредных веществ, что важно для здоровья и безопасности. В-третьих, она достаточно податлива для художественной отделки, что позволяет вписать полку в различные стили интерьера.

Древесина также является лидером среди экологических материалов и способна придать уют интерьеру. Она активно используется при изготовлении мебели и создании декоративных элементов. Однако есть и некоторые недостатки, такие как высокая стоимость большого массива древесины, образование отходов при обработке, а также размеро- и формоизменяемость материала [1]. Несмотря на эти недостатки, древесина все равно имеет больше преимуществ, чем недостатков, и поэтому была выбрана в качестве материала для изготовления декоративной полки.

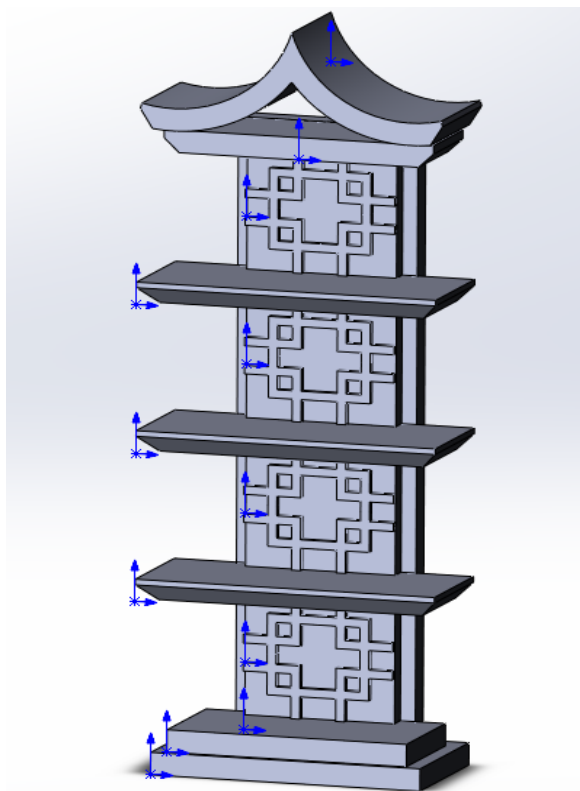


Рис. 1. 3D-модель декоративной полки

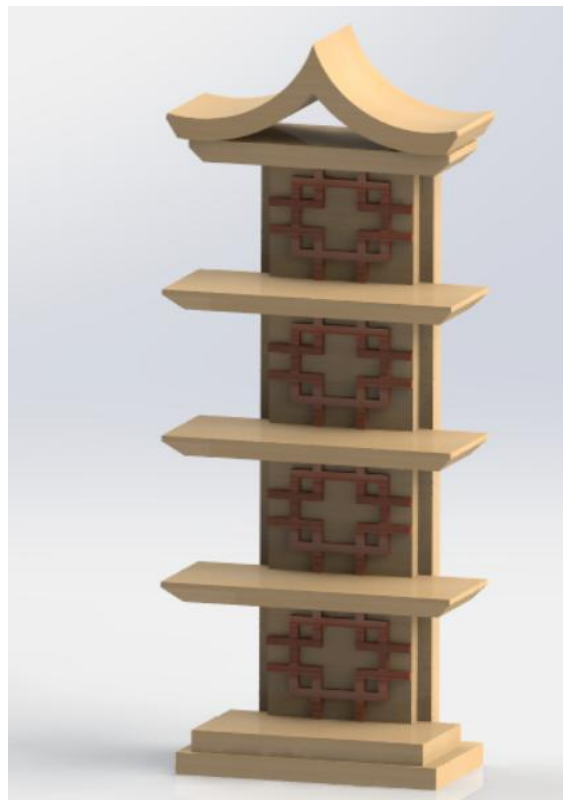


Рис. 2. Рендер декоративной полки

Для изготовления настенной декоративной полки было решено выбрать мебельный щит из бука. Он отличается высокой прочностью, длительной эксплуатацией и красивой текстурой.

Способ изготовления изделия выбирается в зависимости от типа производства (массовое, серийное, единичное), а также от требований к качеству. Важно подобрать наиболее подходящий способ изготовления и на каждом этапе производства изделия установить требуемый уровень точности [2]. Это во многом определяет как себестоимость изготовления, так и качество готовых изделий.

С учетом всех геометрических особенностей настенной полки в качестве наиболее подходящего способа обработки был выбран фрезерно-гравировальный станок с числовым программным управлением (ЧПУ) [3]. Станки с ЧПУ позволяют точно и качественно получить сложные орнаменты, снижают до минимума возможность получения брака [4], а самое главное – обладают высокой производительностью.

Отделка – это последний этап изготовления деревянного изделия. Необходимо нанести отделочное покрытие по направлению древесного волокна для того, чтобы защитить дерево от грязных и жирных пятен, а также влаги. Для увеличения износостойкости и долговечности древесины используется покрытие на масляной основе.

В результате проделанной работы разработана 3D-модель декоративной полки в китайском стиле с использованием систем автоматизированного проектирования, выполнен рендер декоративной полки в программе SolidWorks, назначен материал изделия, с учетом

геометрических особенностей изделия выбран способ обработки на фрезерно-гравировальном станке с числовым программным управлением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андреева Е.А. Художественная работа по дереву. М.: Рипол Классик, 2007. 384 с.
2. Родионов В.А., Солодова Н.О. Моделирование обработки матрицы для получения рельефного оттиска на тонколистовом материале // Молодежная наука: вызовы и перспективы: матер. II Всерос. науч.-практ. конференции студентов и молодых ученых. Сызрань, 2019. С. 128–130.
3. Родионов В.А., Солодова Н.О. Моделирование рельефной матрицы для получения оттиска на тонколистовом материале в программе SolidWorks // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. конф. Самара, 2018. С. 112–115.
4. Абрамова О.К., Родионов В.А. Разработка 3D-модели изделия «Органайзер для украшений» // Высокие технологии в машиностроении: матер. всерос. науч.-техн. конференции. Самара, 2023. С. 3–5.

УДК 621.9.047

**ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ
СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ
МИКРОПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ
ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

Болдырев А.А., доцент, к.т.н., доцент, **Болдырев А.И.**, профессор, д.т.н., профессор,
Григораш В.В., доцент, к.т.н., доцент

*Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: alexboldyrev@yandex.ru*

Рассмотрен механизм формирования микроповерхности, приведено его экспериментальное подтверждение. Выполнено математическое моделирование процесса формирования микроповерхности, получены зависимости, дающие возможность определять скорости анодного растворения металла. Установлено, что для каждой группы сплавов соотношение между глубиной микрорастворивания и высотой неровностей практически одинаково. Таким образом, по известной структуре сплава можно посредством математической модели найти высоту неровностей и оценить предел прочности материала.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, микроповерхность, усталостная прочность, коррозионная стойкость

**INCREASING FATIGUE STRENGTH AND CORROSION RESISTANCE
OF MACHINE PARTS BY FORMING ALLOYS MICROSURFACE
DURING ELECTROCHEMICAL TREATMENT**

Boldyrev A.A., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Boldyrev A.I., Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor,
Grigorash V.V., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
E-mail: alexboldyrev@yandex.ru*

The mechanism of microsurface formation is considered, and its experimental confirmation is provided. Mathematical modeling of the microsurface formation process has been carried out, and dependencies have been obtained that make it possible to determine the rate of anodic dissolution of the metal. It has been established that for each group of alloys the relationship between the depth of microetching and the height of irregularities is almost the same. Thus, based on the known structure of the alloy, it is possible to find the height of the irregularities and estimate the tensile strength of the material using a mathematical model.

Keywords: electrochemical processing, microsurface, fatigue strength, corrosion resistance

Процесс электрохимической размерной обработки (ЭХРО) проходит на малых (десятые доли миллиметра) зазорах между электродами, за счет чего достигается высокая избирательность съема металла и формирование поверхности деталей. Однако перенесение модели формообразования макроповерхности на микроповерхность дает результаты, противоречащие известным фактическим данным. С этих позиций невозможно объяснить, почему после достижения определенной границы уменьшения шероховатости рабочей поверхности инструмента шероховатость детали не изменяется. Кроме того, известно, что каждая группа материалов имеет предельную шероховатость поверхности, которая изменяется в узком диапазоне при различных режимах обработки и составах электролита. Поэтому необходимо принять другую гипотезу, объясняющую механизм формирования микроповерхности на всех сплавах с учетом пассивации поверхности. Известные фактические материалы наиболее

полно объясняет гипотеза, изложенная в работе [1], где был предложен механизм анодного окисления алюминия при гальванических процессах, по которому на поверхности металла под действием электрического тока образуется слой типа плазменного, а окисная пленка, появляющаяся на воздухе, растворяется и по завершении процесса образуется как результат полимеризации плазменного слоя. Подобный механизм может иметь место при ЭХРО некоторых металлов, где плотность электрического тока может быть на несколько порядков выше, чем при гальванической обработке.

Из экспериментальных данных ЭХРО различных сплавов известно, что на каждом из них образуется поверхностная пленка. Для начального растворения наиболее устойчивой окисной пленки на некоторых титановых сплавах, например марки ОТ4, необходимо осуществить подогрев электролита до 40–45 °С, введение в раствор поваренной соли KBr или повышение напряжения на электродах до 20–30 В. Однако после начала процесса ЭХРО съём металла идет вполне удовлетворительно, если даже снизить напряжение на электродах до 10–12 В. Это указывает на растворение окисной пленки, имевшейся на детали. Если же процесс ЭХРО прервать хотя бы на короткое время, что имеет место при обработке деталей с периодическим «ощупыванием» зазора, то на поверхности, на которой снимался металл, образуется пленка, существенно отличающаяся от исходной:

- по внешнему виду она имеет голубой или розовый цвет и напоминает окислы, имеющие место вследствие термической обработки;

- пленка чрезвычайно стойка к воздействию анионов Cl и Br, так что после перерыва возобновить процесс съема металла, как правило, практически не удается или же поверхность обрабатывается только на отдельных участках.

Эти обстоятельства также подтверждают, что образующаяся в ходе процесса пленка отличается от той, которая была на заготовке.

Пассивирование титановых сплавов до состояния, когда они уже не могут быть подвергнуты растворению при ЭХРО, нашло практическое применение при изготовлении токонесущей оснастки к станкам. Идея была реализована в способе, по которому детали из сплава ОТ4 устанавливали в рабочее положение, подключали к положительному полюсу источника питания и обрабатывали при низкой плотности тока порядка 1,5–2 А/см² в среде электролита, загрязненного продуктами обработки стали. Наиболее интересен тот факт, что устойчивая к растворению структура анодной пленки образуется только в том случае, когда электролит сильно загрязнен гидроокислами железа и других элементов. Сущность этого явления полностью не изучена, но ясно, что создаются предпосылки управления процессом образования пленок с требуемыми свойствами, что явно согласуется с механизмом, предложенным электрохимиками Казанской научной школы (проф. А.Ф. Богоявленский, проф. В.П. Смоленцев и др.). Следует заметить, что при замене материала другим титановым сплавом, например марки ВТЗ-1, эффект пассивации не достигался, хотя на поверхности образовывалась пленка, внешне очень схожая с той, которая имела место у сплава ОТ4.

Если рассмотреть ЭХРО других сплавов, где пассивационные явления оказывают меньшее влияние на процесс, то можно использовать известные сведения по коррозии сплавов. Но в отличие от коррозии, где процесс протекает избирательно и относительно медленно со скоростью долей мм в год под действием микротоков, то при ЭХРО микроповерхности формируются в первые же секунды обработки уже под действием внешнего тока от источника питания.

Тогда можно принять, что микроповерхности при ЭХРО формируются воздействием внешнего тока вследствие различной электропроводности структурных составляющих металла в конкретных электролитах. Как известно [2], электропроводность связки существенно ниже, чем у зерна, за счет чего на его границах возникает повышенная плотность внешнего тока и интенсивный съём металла. Сама связка имеет толщину на 1–2 порядка ниже, чем зерно, поэтому она удаляется практически одновременно с зерном.

На базе таких предположений было выполнено математическое моделирование процесса формирования микроповерхности. При этом допускалось, что все структурные составляющие сплава имели правильную геометрическую форму (прямоугольник) и были одинаково ориентированы относительно обрабатываемой поверхности.

Скорость растворения металла нормально поверхности описывается зависимостью [3]:

$$\frac{dy}{dt} = \eta \frac{\varepsilon \chi}{\gamma} |\text{grad } U| \sqrt{1 - \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} - \eta \frac{\varepsilon \chi U}{\gamma s}, \quad (1)$$

где η – выход по току;
 ε – электрохимический эквивалент металла анода;
 χ – электропроводность электролита в зазоре;
 γ – плотность материала детали;
 U – напряжение на электродах;
 s – зазор между электродами;

$$|\text{grad } U| = \sqrt{\left(\frac{dU}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dU}{dy}\right)^2}.$$

При решении уравнения необходимо учитывать следующие граничные условия:

– величина тока, проходящего через связку, существенно ниже по сравнению с зерном и ее изменением можно пренебречь;
– через боковые границы зерна ток практически не проходит или его изменение пренебрежимо мало.

Численным методом были выполнены работы по формированию микроповерхности, которые показали, что без учета пассивационных явлений время формирования неровностей составляло 0,3–0,5 с. При дальнейшей обработке величина неровностей оставалась неизменной. При принятии во внимание ограничений, вызванных наличием пленок, расчетное время формирования возрастало в несколько раз.

При ЭХРО отсутствует механический контакт инструмента с деталью, поэтому как высота неровностей, характеризующая шероховатость поверхности, так и глубина микрораствориваний возникают под действием одних факторов и, следовательно, должны быть взаимосвязаны.

Исследовано несколько групп материалов, на примере которых удалось установить, что для каждой группы при постоянном режиме обработки соотношение между глубиной микрораствориваний и высотой неровностей практически постоянно [4]. Следовательно, выполняя относительно доступные изменения шероховатости, по известному соотношению величин можно оценить глубину микрораствориваний, т. е. правильно назначить припуск, необходимый для удаления дефектного слоя.

Величина неровностей зависит от способа измерения параметра. Применительно к ЭХРО целесообразно использовать щуповые приборы (профилографы и профилометры) желательно без замены измерительной головки и иглы, чтобы исключить систематические погрешности. Вследствие специфики рельефа поверхности при использовании бесконтактных приборов возникают погрешности измерений в пределах 1–2 классов по ГОСТ 2789-73, в основном в сторону завышения действительных результатов.

Шероховатость поверхности является определяющим фактором при оценке прочности материалов в случае циклических нагрузжений. Используя технологические возможности ЭХРО по достижению малой шероховатости поверхности, можно управлять изменением предела прочности сплавов в весьма широком диапазоне. Как показали наши исследования, уменьшение шероховатости на один класс увеличивает предел прочности на 2–5 %.

Известно, что при одинаковой шероховатости поверхности материалов предел их прочности после ЭХРО несколько снижается по сравнению с механической обработкой [5]. Предел прочности на базе 10^7 циклов составляет

$$\sigma_{-1} = A_{\text{ш}} R_a^\alpha, \quad (2)$$

где $A_{\text{ш}}$ и α – коэффициенты, зависящие от марки материала;
 R_a – высота микронеровностей.

Таким образом, по известной структуре сплава и режиму обработки можно с помощью математической модели найти высоту неровностей, после чего оценить предел прочности материала. Следовательно, предусматривая уменьшение шероховатости поверхности в пределах технологических возможностей нового метода, можно не только достичь предела прочности сплава, характерного для базового варианта технологического процесса, но и превысить его. Для сталей с мелкозернистой структурой достаточно уменьшить шероховатость на один разряд в пределах класса по ГОСТ 2789-73, чтобы выровнять прочность материалов при обоих вариантах обработки. Однако в конструкторской документации деление в пределах класса не принято, поэтому изменяют шероховатость не менее чем на 1 класс (см. таблицу).

Шероховатость поверхности различных материалов

Группа материалов	Наименьшая шероховатость, достижимая при ЭХРО, класс	Уменьшение шероховатости, необходимое для восстановления усталостной прочности сплава, класс
Легирован. констр. стали	9–10	1
Жаропрочные сплавы	8	2
Алюминиевые сплавы	8-9	1
Титановые сплавы	7–8	2–3

Данные таблицы получены расчетным путем с округлением результатов до целого класса шероховатости. Экспериментальные данные однозначно подтвердили справедливость сведений, приведенных в таблице. Это дает основание принять предложенную модель формирования микроповерхности и применять ее для практических вычислений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Богоявленский А.Ф. К теории анодного окисления алюминия // Известия вузов. Химия и химическая технология. 1971. Т. XIV. № 5. С. 61–66.
2. Теплухин Г.Н., Гропянов А.В. Металловедение и термическая обработка: учеб. пособие / СПбГТУ РП. СПб, 2011. 169 с.
3. Болдырев А.И. Инженерия поверхностного слоя изделий при электрохимической и комбинированной обработке // Вестник Донского гос. техн. ун-та. 2009. Т. 9. № 4 (43). С. 626–636.
4. Болдырев А.И., Болдырев А.А., Григораш В.В. Влияние режимных параметров процесса анодного растворения на обеспечение качества электрохимического формообразования // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2017. Т. 13. № 4. С. 98–104.
5. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1980. 240 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ НИОБИЕВЫХ СПЛАВОВ

Болдырев А.А., доцент, к.т.н., доцент, **Болдырев А.И.**, профессор, д.т.н., профессор, **Падурец А.А.**, магистрант

*Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: alexboldyrev@yandex.ru*

Представлены экспериментальные данные по исследованию анодного растворения и обрабатываемости методом электрохимической обработки деталей из материалов нового поколения – промышленных ниобиевых сплавов марок ВН-2, ВН-2А, ВН-2АЭ, ВН-3 и технического ниобия Nb в щелочных KOH и бромидных KBr электролитах. Дана характеристика поверхностного слоя детали после обработки. Приведены рекомендуемые оптимальные условия обработки, обеспечивающие производительность до 1 мм/мин и шероховатость обработанной поверхности до $R_a = 1,25$ мкм.

Ключевые слова: ниобиевые сплавы, электрохимическая обработка, производительность, качество поверхности

EXPERIMENTAL STUDIES ON TECHNOLOGICAL INDICATORS FOR THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL PROCESSING MACHINE PARTS FROM NIOBIUM ALLOYS

Boldyrev A.A., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Boldyrev A.I.**, Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Padurets A.A.**, Master's Degree student

*Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
E-mail: alexboldyrev@yandex.ru*

The authors present experimental data on the study of anodic dissolution and machinability by electrochemical processing of parts made from new generation materials – industrial niobium alloys and technical niobium Nb in alkaline KOH and bromide KBr electrolytes. The characteristics of the parts surface layer after processing are given. Recommended optimal processing conditions are calculated, ensuring productivity up to 1 mm/min and roughness of the machined surface up to $R_a = 1.25$ μm .

Keywords: niobium alloys, electrochemical machining performance, surface quality

Ниобиевые сплавы, относящиеся к материалам нового поколения, по своим физико-механическим и технологическим характеристикам являются одними из наиболее перспективных конструкционных материалов для атомной энергетики, ракетно-космической и авиационной техники, химического машиностроения и других отраслей промышленности [1]. В частности, такие сплавы вследствие их высокой прочности и жаростойкости (могут работать при 800–1300 °С) применяются при изготовлении рабочих лопаток компрессоров газотурбинных двигателей, турбинных дисков, колец и др. Одним из методов обработки деталей из таких материалов является электрохимическая обработка (ЭХО) в щелочных и бромидных растворах путем анодного растворения материала.

Однако известные из литературы данные о влиянии различных факторов ЭХО на качественные показатели обрабатываемости ниобиевых сплавов в щелочных и бромидных электролитах весьма немногочисленны [2], а для некоторых сплавов, в частности для ВН-2А и ВН-2АЭ, полностью отсутствуют. Вследствие этого с целью получения данных для сравнения эффективности обработки нескольких ниобиевых сплавов (ВН-2, ВН-2А, ВН-2АЭ

и ВН-3 по ГОСТ 26468-85) и технического ниобия Nb в указанных растворах предпринято широкое исследование, включающее как изучение анодного растворения, так и технологические испытания их обрабатываемости методом ЭХО.

Технологические испытания обрабатываемости сплавов проводились на специально спроектированной и изготовленной установке, позволяющей вести обработку на постоянном межэлектродном зазоре независимо от изменения других параметров процесса (кроме рабочего напряжения). Режимные параметры ЭХО изменялись в следующих пределах: плотность тока j – 10–100 А/см², рабочее напряжение U – до 50 В, концентрация электролита – 10–35 %, температура электролита T – 20–60 °С, рН электролита – 3–12, скорость электролита v – 10–50 м/с, межэлектродный зазор s – 0,1–0,5 мм [3].

В ходе исследования определялась производительность ЭХО, энергоёмкость процесса, выход по току и показатели качества обработанной поверхности (высота микронеровностей, склонность к образованию макродефектов и межкристаллитному растравливанию).

Производительность ЭХО в щелочных растворах сравнительно мало зависела от состава обрабатываемых сплавов. Например, в 25 % растворе КОН при $j = 100$ А/см² значения производительности съема, определяемой скоростью анодного растворения v_p , для пяти сплавов (ВН-2, ВН-2А, ВН-2АЭ, ВН-3 и технического ниобия Nb) различались не более чем на 1 %. В то же время при ЭХО в бромидном электролите отмечалась несколько повышенная скорость обработки сплавов ВН-2АЭ и ВН-3 (рис. 1), что хорошо согласуется с данными работы [4].

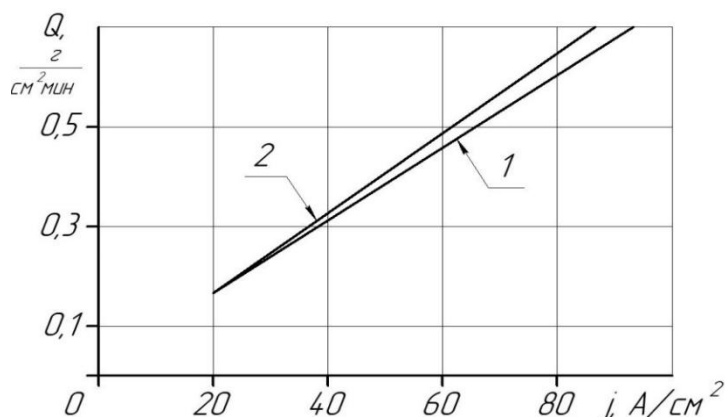


Рис. 1. Зависимость производительности от плотности тока при ЭХО ниобиевых сплавов в бромидном электролите:

1 – ВН-2, ВН-2А и Nb; 2 – ВН-2АЭ и ВН-3;
электролит – 15 % КВг; рН = 7,5; $T = 20$ °С; $v = 30$ м/с; $s = 0,3$ мм

Обработке сплавов в щелочных растворах была присуща малая устойчивость при пониженных плотностях тока концентрации КОН. Вместе с тем при повышенных плотностях тока и достаточно большом содержании КОН в электролитах наблюдались несколько большие значения v_p , чем в растворах КВг, что, в частности, достигалось за счет более высоких значений напряжения и энергоёмкости ЭХО (так, для 20 % растворов КОН и КВг при $j = 60$ А/см² энергоёмкость составляла 87 и 69 кВт·ч/кг соответственно).

Зависимость производительности от плотности тока была близка к линейной как в растворах КОН, так и в растворах КВг. Некоторые отклонения от линейной зависимости в бромидном электролите при высоких плотностях тока j , по-видимому, объясняются усилением побочных анодных реакций (см. рис. 1). Изменение концентрации бромидного и щелочного электролитов, так же как и величины рН (в случае КВг), сравнительно мало отражалось на скорости обработки.

Нагревание электролитов незначительно влияло на производительность процесса (в растворах КОН, 15 % растворе КВг). Увеличение скорости электролитов вызвало в большинстве случаев незначительное повышение скорости обработки, более заметное при повышенных значениях j . Изменение величины зазора в диапазоне 0,3–0,5 мм не оказывало

заметного влияния на производительность, в то время как его уменьшение до 0,1 мм делало ЭХО невозможной из-за затруднений транспортирования реагентов и облегчения пассивирования металла.

Рассчитанные значения выхода по току колебались от 62 до 87 %, причем несколько увеличенными значениями характеризовался процесс анодного растворения материала в растворах КОН.

ЭХО деталей машин из ниобиевых сплавов позволяла при оптимальных условиях получать бездефектную поверхность с шероховатостью до $R_a = 1,25$ мкм в бромидных электролитах и $R_a = 5-2,5$ мкм в щелочных электролитах. После обработки в щелочных растворах поверхность сплавов была, как правило, темно-серого цвета с растравлением в виде гребней. В то же время ЭХО (кроме сплава ВН-3) сплавов приводила к получению блестящей (с образованием фигур травления у сплава ВН-2) поверхности. При ЭХО сплава ВН-3 наблюдался серый цвет обработанной поверхности.

С ростом плотности тока во всех случаях отмечалось значительное снижение высот микронеровностей обработанных поверхностей (рис. 2 и 3). При ЭХО в растворах КОН шероховатость была наименьшей у ниобия и сплава ВН-3, а в растворах KBr – у сплава ВН-2АЭ. Повышение концентрации электролитов сопровождалось, как правило, увеличением шероховатости.

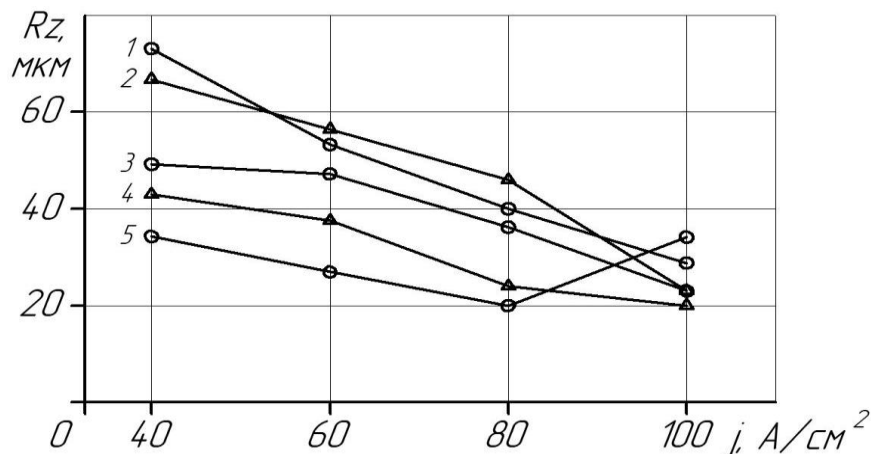


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от плотности тока при ЭХО ниобиевых сплавов в щелочном электролите:
1 – ВН-2АЭ; 2 – ВН-2; 3 – ВН-2А; 4 – ВН-3; 5 – Nb;
электролит – 25 % КОН; $T = 20$ °С; $v = 30$ м/с; $s = 0,3$ мм

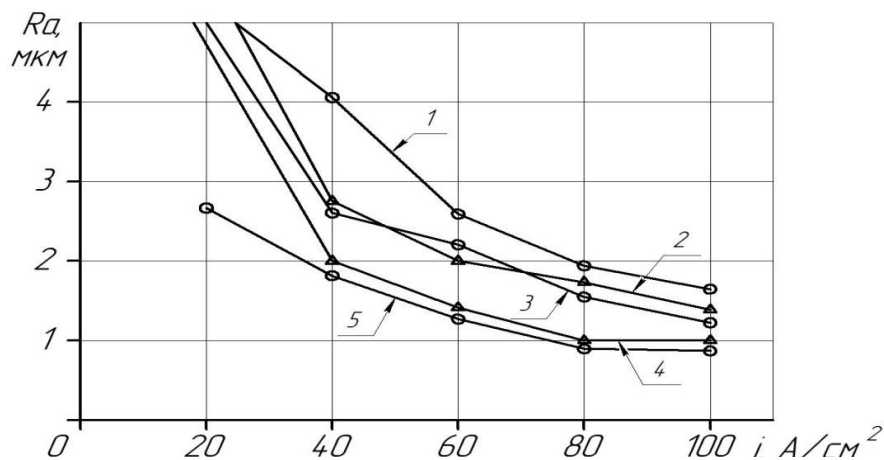


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности от плотности тока при ЭХО ниобиевых сплавов в бромидном электролите:
1 – ВН-3; 2 – Nb; 3 – ВН-2А; 4 – ВН-2; 5 – ВН-2АЭ;
электролит – 15 % KBr; pH = 7,5; $T = 20$ °С; $v = 30$ м/с; $s = 0,3$ мм

Нагревание растворов КОН, практически не оказывая влияния на величину шероховатости, приводило к уменьшению макродефектов, но в случае растворов KBr повышение температуры несколько увеличивало шероховатость.

Увеличение скорости течения бромидного электролита до 30–50 м/с способствовало снижению высоты микронеровностей, тогда как в щелочном растворе электролита наблюдалась обратная зависимость. В обоих электролитах достижению минимальной шероховатости способствовала обработка на зазоре s , равном 0,3 мм.

Выполненные металлографические исследования микроструктуры поверхностного слоя образцов из сплавов ВН-2 и ВН-2АЭ, обработанных ЭХО в растворах КОН и KBr, позволили установить, что межкристаллитного растравливания в процессе обработки не происходит.

Результаты проведенных исследований позволили рекомендовать следующие оптимальные условия ЭХО ниобиевых сплавов, обеспечивающих производительность до 0,95 мм/мин, высоту микронеровностей до $R_a = 2,5–1,25$ мкм при отсутствии макродефектов и межкристаллитного растравливания:

электролит	15 % KBr	20 % КОН
плотность тока	40–100 А/см ²	60–80 А/см ²
скорость электролита	30 м/с	10–30 м/с
температура	20–40 °С	20–40 °С
зазор	0,3–0,4 мм	0,3–0,4 мм
рН	7–10	

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ниобий и титан / А.Н. Залиман, Б.Г. Коршунов, Е.В. Елютин, А.М. Захаров. М.: Металлургия, 1990. 296 с.
2. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1989. 448 с.
3. Болдырев А.И., Болдырев А.А., Григораш В.В. Влияние режимных параметров процесса анодного растворения на обеспечение качества электрохимического формообразования // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2017. Т. 13. № 4. С. 98–104.
4. Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, В.А. Нисс, А.Э. Паршутто, А.С. Будницкий // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 3. С. 211–219.

УДК 378.147.88

КОМПЬЮТЕРНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

Гаспарова Л.Б. ✉, доцент, к.п.н., доцент

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

Рассматривается опыт преподавания компьютерных дисциплин для студентов машиностроительного профиля. В качестве направления для повышения эффективности подготовки студентов рассмотрена возможность совершенствования содержания лабораторных и курсовых работ. Содержание лабораторного цикла позволяет студентам получить навыки выполнения чертежей деталей и узлов металлорежущих станков, объемного моделирования, сборки, выполнения расчетов механизмов, узлов и конструкций оборудования и его инженерного анализа с целью выбора оптимальных параметров.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, лабораторная работа, станочное оборудование, современные CAD/CAM/CAE-системы, компьютерное проектирование изделий

COMPUTER COMPONENT IN TEACHING STUDENTS OF MECHANICAL ENGINEERING

Gasparova L.B. ✉, Associate Professor, PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor

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

The experience of teaching computer disciplines for students of mechanical engineering is considered. As a direction to improve the effectiveness of student training, the possibility of improving the content of laboratory work and final qualification work is considered.

Keywords: computer modeling, laboratory work, machine tools, modern CAD/CAM/CAE-systems, computer-aided product design

Сейчас невозможно представить себе современное машиностроительное предприятие без автоматизированных систем, предназначенных для проектирования изделий и создания и обработки конструкторской документации. Современный инженер-конструктор или инженер-технолог должен быть не только хорошим специалистом в своей предметной области, но и иметь профессиональные навыки работы с компьютерной техникой и средствами автоматизированного проектирования. По результатам опроса, проведенного в структурных подразделениях ведущих предприятий машиностроительного профиля, выявлено, что предприятию требуются специалисты, имеющие следующие компетенции для проведения конструкторско-технологических работ [1]:

- применение средств автоматизации при проведении научных и инженерных расчетов;
- применение современного программного обеспечения при подготовке чертежей, схем и конструкторской документации;
- применение средств автоматизации в процессах обработки конструкций изделий и испытаний.

В связи с этим для подготовки конкурентоспособного специалиста одним из приоритетных направлений развития является трансформация учебного процесса с целью формирования цифровых компетенций у студентов.

Кафедра «Технология машиностроения, станки и инструменты» СамГТУ осуществляет подготовку бакалавров по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и обеспечивает выполнение сквозной компьютерной подготовки, которая начинается с дисциплины «Инженерная и компьютерная графика» (общетехнической кафедра) и заканчивается рядом дисциплин кафедры.

Курс «Инженерная и компьютерная графика» способствует приобретению графической грамотности. Его целью является развитие пространственного представления и воображения и конструктивно-геометрического мышления, способности к анализу и синтезу пространственных форм. Студент должен овладеть знаниями построения чертежа, уметь читать и составлять графическую и текстовую конструкторскую документацию в соответствии с требованиями стандартов. Знания, приобретенные в этом курсе, являются основой для выполнения курсовых проектов последующих дисциплин профессионального цикла.

Далее компьютерная подготовка продолжается при изучении дисциплин, реализуемых кафедрой: «Основы компьютерного моделирования в машиностроении», «Компьютерное проектирование изделий», «Системы компьютерной поддержки инженерных решений» (на примере профиля подготовки «Цифровые и сервисные технологии в станкостроении и металлообработке»).

Концепция компьютерной подготовки заключается в последовательном освоении студентами навыков автоматизированного проектирования и использовании их при выполнении курсовых работ, и дипломного проектирования [2]. Содержание лабораторного цикла вышеперечисленных компьютерных дисциплин позволяет студентам получить навыки выполнения чертежей деталей и узлов технологического оборудования (например, чертежи деталей и узлов коробки скоростей и шпиндельного узла), объемного моделирования, сборки и анимации принципа работы таких объектов, как коробка скоростей и шпиндельный узел в редакторе КОМПАС-3D, навыки выполнения расчетов механизмов, узлов и конструкций технологического оборудования и его инженерного анализа с целью выбора оптимальных параметров в программах ANSYS, APM WinMachine (рис. 1, 2).

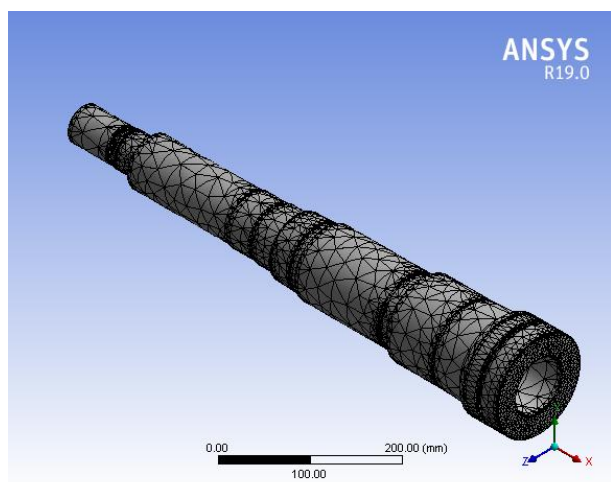


Рис. 1. Конечно-элементная модель шпинделя

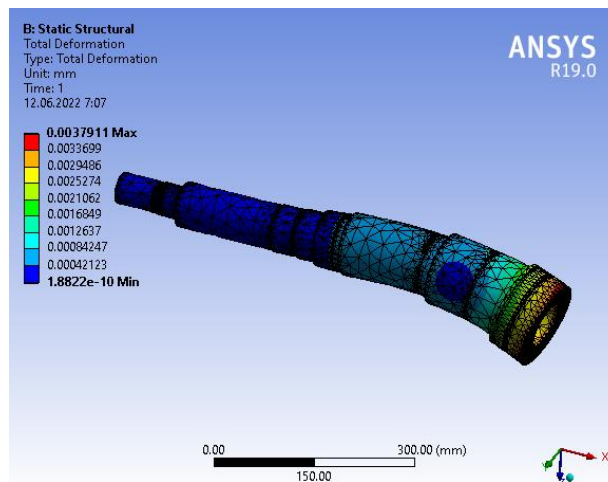


Рис. 2. Деформация шпинделя

Эффективность приобретенных навыков студенты могут оценить при выполнении курсовых работ и проектов, выпускной квалификационной работы, содержание которых построено на использовании полученных навыков автоматизированного проектирования.

Так, например, графическая часть выпускной квалификационной работы содержит следующие чертежи, выполняемые с использованием редактора КОМПАС-3D:

- кинематические схемы базового и модернизируемого станков;
- сборочные чертежи коробки скоростей привода главного движения с многоскоростным двигателем и коробки диапазонов скоростей привода главного движения с бесступенчатым регулированием;
- 3D-модель базового шпиндельного узла (рис. 3);
- сборочный чертеж модернизированного шпиндельного узла.

Выполнение в ходе учебного процесса лабораторных и практических работ и курсовых проектов с применением САД- и САЕ-продуктов, предназначенных для автоматизации работ

промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, способствует развитию навыков инженерного мышления и переходу к современным методам проектирования. Начиная с курса компьютерной графики и вовлекая по мере готовности преподавателей дисциплин «Основы компьютерного моделирования в машиностроении», «Компьютерное проектирование изделий», «Системы компьютерной поддержки инженерных решений», вполне можно выйти в подготовке студентов на уровень, отвечающий современным требованиям промышленности. Студенты, освоившие навыки автоматизированного проектирования современного конкурентоспособного оборудования, несомненно, будут востребованы на многих промышленных предприятиях.

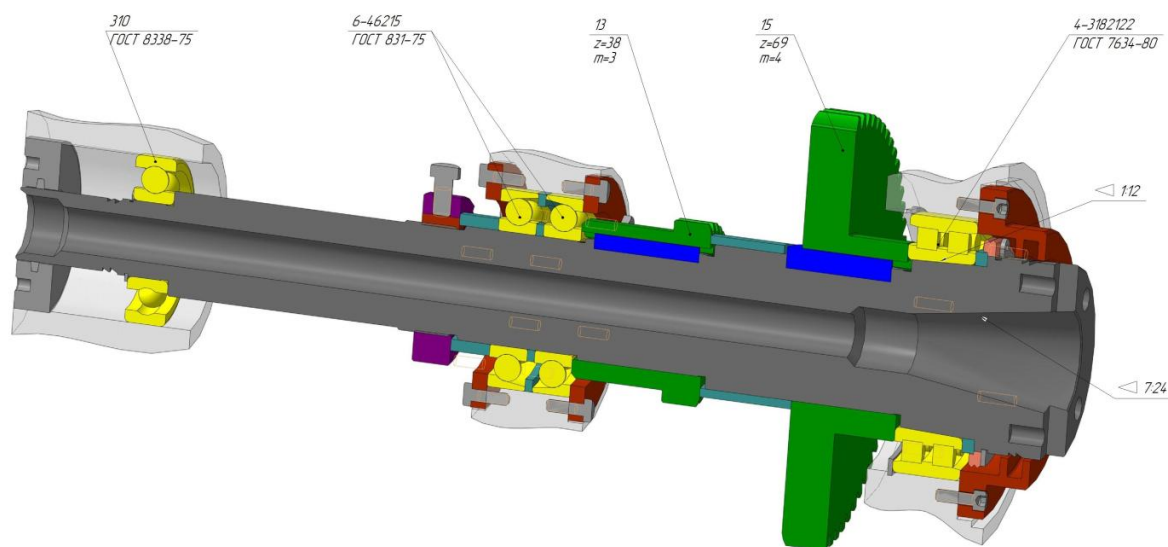


Рис. 3. 3D-модель шпиндельного узла

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Применение программного обеспечения АСКОН в реализации образовательных дисциплин вуза / Н. Денисова, А. Доронин, Ю. Завалишин [и др.] // САПР и графика. 2014. № 3 (209). С. 74–79.
2. Денисенко А.Ф., Гаспарова Л.Б. Сквозная компьютерная подготовка студентов машиностроительного профиля // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Психолого-педагогические науки. 2010. № 6 (14). С. 53–57.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

Олешко В.С. ✉, к.т.н., доцент

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация*

E-mail: oleshkovs@mai.ru

Представлены результаты разработки алгоритма определения величины поверхностной энергии металлических деталей машин при их производстве, эксплуатации и ремонте методом контактной разности потенциалов. Отмечена перспективность применения метода контактной разности потенциалов в неразрушающем контроле деталей машин.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, производство, эксплуатация, ремонт

ALGORITHM FOR DETERMINING THE SURFACE ENERGY OF METAL MACHINE PARTS BY THE CONTACT POTENTIAL DIFFERENCE METHOD

Oleshko V.S. ✉, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation,

E-mail: oleshkovs@mai.ru

The results of the development of an algorithm for determining the value of surface energy of metal machine parts during their production, operation and repair using the contact potential difference method are presented. The prospects of using the contact potential difference method in non-destructive testing of machine parts are noted.

Keywords: non-destructive testing, production, operation, repair

В процессе производства, эксплуатации и ремонта металлических деталей машин (МДМ) необходимо обеспечивать их исправное состояние. Метод контактной разности потенциалов (КРП) неразрушающего контроля позволяет определять энергетическое состояние поверхности МДМ. Энергетическое состояние поверхности детали выражает поверхностная энергия (ПЭ). От уровня ПЭ зависит качество технологических процессов, например таких, как пайка, сварка, склеивание. Влияет ПЭ и на триботехнические свойства МД. Между тем определение величины ПЭ твердых тел является сложной, но актуальной задачей [1, 2].

Величина ПЭ металлов коррелирует с величиной работы выхода из них электронов (РВЭ). Поверхностная энергия металлов прямо пропорциональна силам межатомного взаимодействия в них, проявлением которых и является РВЭ. Также величина ПЭ металлов прямо пропорционально коррелирует со значениями их твердости.

Целью работы является разработка алгоритма определения ПЭ МДМ методом КРП.

Физическая сущность метода КРП, который по отечественной классификации относится к электрическому виду неразрушающего контроля, заключается в анализе соотношения работ выхода материала контролируемой детали и материала измерительного электрода (ИЭ) датчика прибора измерения КРП. Если учесть, что работа выхода ИЭ заранее известна, и измерить прибором КРП между ИЭ и контролируемой деталью, можно определить неизвестную РВЭ детали. Теперь, если измерить на поверхности контролируемой МДМ КРП, то РВЭ детали определяется по формуле [3]

$$U = (\varphi_{иэ} - \varphi)/e, \quad (1)$$

где U – КРП между ИЭ датчика прибора и контролируемой МДМ, В; $\varphi_{иэ}$ и φ – работа выхода ИЭ и контролируемой МДМ, Дж; e – заряд электрона, Кл.

Из формулы (1) можно найти величину РВЭ, контролируемой МДМ φ :

$$\varphi = \varphi_{из} - e \cdot U. \quad (2)$$

Формула (2) будет далее использована нами при расчете величины ПЭ МДМ с учетом их электронной структуры, которая находит отражение в энергетическом состоянии поверхности материала контролируемой детали. Металлы, имеющие большие значения РВЭ, имеют и большие значения ПЭ. Таким образом, метод КРП позволяет оперативно оценить состояние поверхности детали с точки зрения электронного строения.

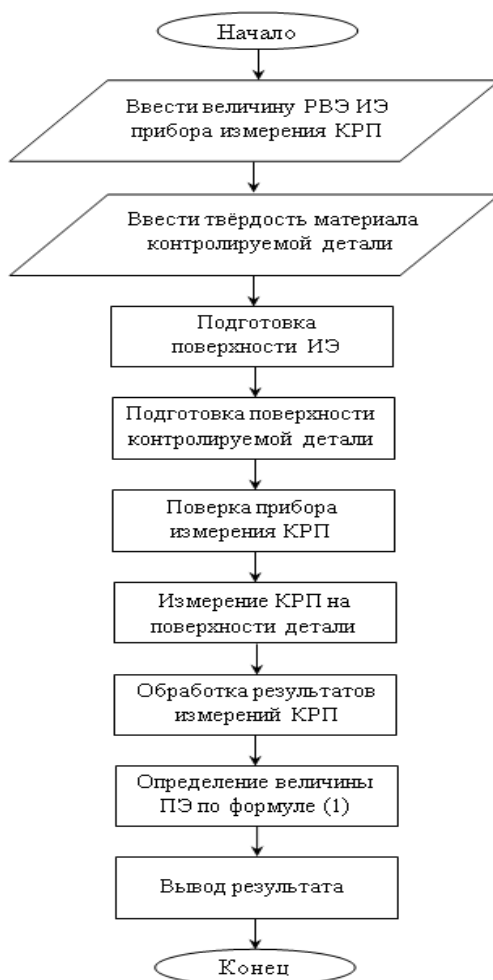
Величина РВЭ контролируемой МДМ хорошо коррелирует с величиной ее ПЭ с учетом твердости материала детали по разработанной нами формуле [4]

$$E = 0,062 \cdot 10^{19} \cdot \varphi \cdot H / S_1 + 0,083, \quad (3)$$

где E – величина ПЭ контролируемой МДМ, Дж/м²; φ – РВЭ детали, рассчитанная по формуле (2), Дж; H – относительная твердость материала; $S_1 = 1 \text{ м}^2$ – «единичная площадь», необходимая для соблюдения размерности ПЭ МДМ.

Как видно из формулы (3), для расчета величины ПЭ МДМ необходимо знание РВЭ и твердости материала, из которого она изготовлена. Величину РВЭ детали позволяет определить метод КРП и последующий расчет ее величины по формуле (2).

Разработку алгоритма определения величины ПЭ МДМ методом КРП проводили с учетом его дальнейшего использования в разработке компьютерной программы. Разработанный алгоритм определения ПЭ представлен на рисунке.



Алгоритм определения величины ПЭ детали методом КРП

Рассмотрим этапы изображенного на рисунке алгоритма. Будем считать, что величина РВЭ ИЭ датчика прибора измерения КРП заранее известна. Величину РВЭ материала ИЭ можно взять из справочника или измерить. В разработанном нами приборе измерения КРП [3] ИЭ изготовлен из технически чистого никеля с РВЭ, составляющей порядка 4,5 эВ.

Твердость материала контролируемой детали можно взять из справочника (если известен материал детали) или же определить ее инструментально. Полученное значение твердости материала детали будет использоваться в исходных данных для расчета величины ПЭ детали посредством компьютерной программы.

Следующим этапом является обязательная поверка прибора измерения КРП, например, способом, основанном на измерении КРП на поверхности эталонного образца. При поверке необходимо сделать несколько измерений КРП в одной точке образца и определить оценку математического ожидания КРП и ее среднее квадратическое отклонение, которые должны незначительно отличаться от измеренных ранее.

Далее следует непосредственно измерение КРП. Вследствие того, что КРП и работе выхода свойственны флуктуации, необходимо делать несколько измерений КРП.

Следующим этапом идет математическая обработка результатов измерений КРП, в ходе которой определяются среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение КРП.

Полученные на предыдущих этапах результаты подставляем в формулу (3) и вычисляем величину ПЭ контролируемой детали. Округление результатов расчетов величины ПЭ детали необходимо и достаточно проводить до сотых долей джоуля.

Этап вывода результата определения ПЭ подразумевает использование ЭВМ либо разработку специализированного прибора определения величины ПЭ МДМ.

Заключение. Определение величины ПЭ методом КРП по разработанному алгоритму позволит повысить качество технологических процессов изготовления и ремонта МДМ, прогнозировать их техническое состояние.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Юров В.М., Гученко С.А., Лауринас В.Ч. Толщина поверхностного слоя, поверхностная энергия и атомный объем элемента // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2018. № 10. С. 691–699.
2. Определение влияния поверхностного натяжения на механические свойства алюминиевого сплава методом компьютерного моделирования / А.П. Амосов, С.В. Воронин, П.С. Лобода, М.Е. Ледаев, К.К. Чаплыгин // Вестник Моск. авиац. ин-та. 2020. Т. 27. № 2. С. 214–222. DOI: 10.34759/vst-2020-2-214-222.
3. Пат. 2717747RU, МПК G01R 29/12. Устройство измерения контактной разности потенциалов металлических деталей авиационной техники / В.С. Олешко, Д.П. Ткаченко, А.В. Федоров. Патентообладатель Моск. авиац. ин-т (нац. иссл. ун-т). Заявл. 14.08.2019; опубл. 25.03.2020 // Бюл. № 9.
4. Пат. 2644982RU, МПК G01N 13/00. Способ определения поверхностной энергии металлических деталей авиационной техники / В.С. Олешко, И.С. Пиговкин. Заявл. 07.07.2016; опубл. 15.02.2018; приоритет 07.07.2016 // Бюл. № 5.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ НАДРЕЗА НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Павлов В.Ф. ✉, д.т.н., профессор, Морозов А.Ю., аспирант, Денискина Е.А., к.т.н., доцент, Михалкина С.А., старший преподаватель, Труфакин А.Э., студент

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
г. Самара, Российская Федерация
E-mail: pavlov.vf@ssau.ru

На основании проведенных экспериментов установлено, что увеличение глубины надреза, нанесенного на предварительно упрочненную поверхность образцов из стали 20 диаметром 50 мм, приводит к уменьшению предела выносливости образцов.

Ключевые слова: остаточные напряжения, предел выносливости, критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF CUT DEPTH ON THE FATILITY LIMIT OF SURFACE-HARDENED SPECIMENS

Pavlov V.F. ✉, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Morozov A.Y., PhD student, Deniskina E.A., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Mikhalkina S.A., senior lecturer, Trufakin A.E., student

Samara State Aerospace University (National Research University), Samara, Russian Federation
E-mail: pavlov.vf@ssau.ru

It is found that increasing the depth of the notch applied to the pre-hardened surface of 50 mm diameter to made from steel 20 specimens leads to a decrease in the endurance limit of the specimens.

Keywords: residual stresses, endurance limit, critical depth of a non-distributed

В работе оценивалось влияние глубины надреза в случае опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) цилиндрических образцов из стали 20 диаметром $D = 50$ мм на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла. Гладкие образцы обкатывались роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии 0,5 кН (ОР1) и 1,0 кН (ОР2). На неупрочненные и упрочненные образцы фасонным резцом наносились круговые надрезы полукруглого профиля трех радиусов: $R = 0,3$ мм, $R = 0,5$ мм и $R = 1,0$ мм (рис. 1, а, б).

Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах по толщине поверхности слоя a определялись экспериментально методом колец и полосок [1] и приведены на рис. 2. Из представленных на рис. 2 эпюр осевых σ_z остаточный напряжений можно видеть, что с увеличением усилия обкатки роликом сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания увеличиваются.

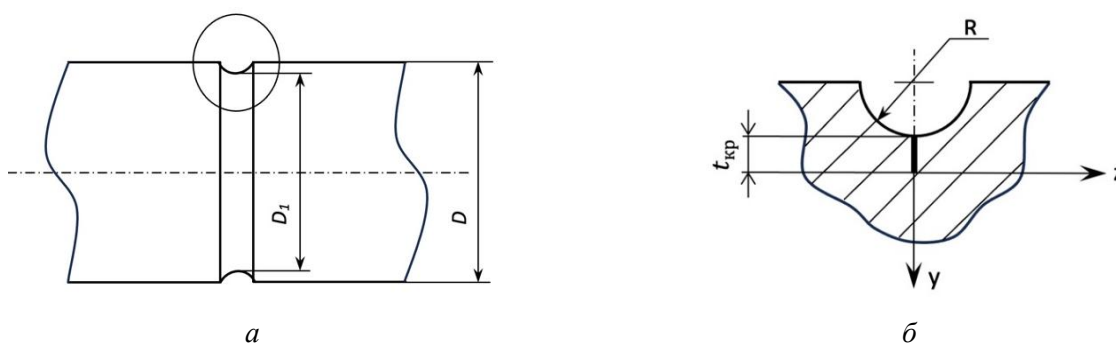


Рис. 1. Образец с надрезом (а) и нераспространяющаяся трещина усталости (б)

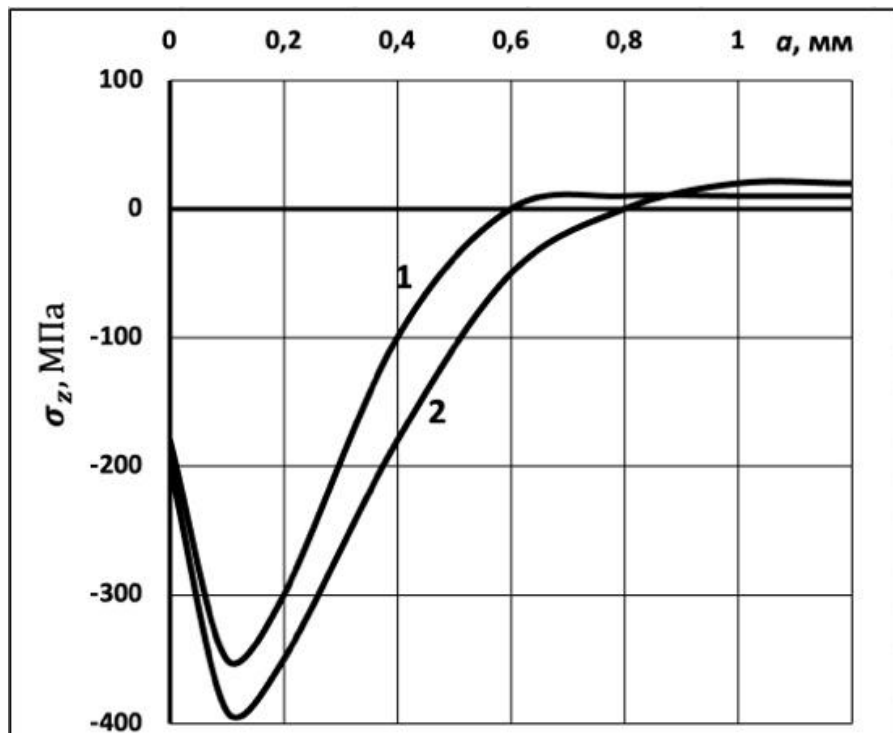


Рис. 2. Осевые σ_z остаточные напряжения в гладких образцах, упрочненных роликом после:
1 – ОР1; 2 – ОР2

Остаточные напряжения в упрочненных образцах с надрезами определялись аналитическим [2] и численным [3] методами суммированием дополнительных остаточных напряжений за счет нанесения надреза и исходных остаточных напряжений. Эпюры осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезом по толщине a опасного сечения приведены на рис. 3, а значения напряжений на поверхностном надрезе $\sigma_z^{\text{пов}}$ – в таблице. Из приведенных данных видно, что с увеличением глубины надреза сжимающие остаточные напряжения в опасном сечении образцов уменьшаются.

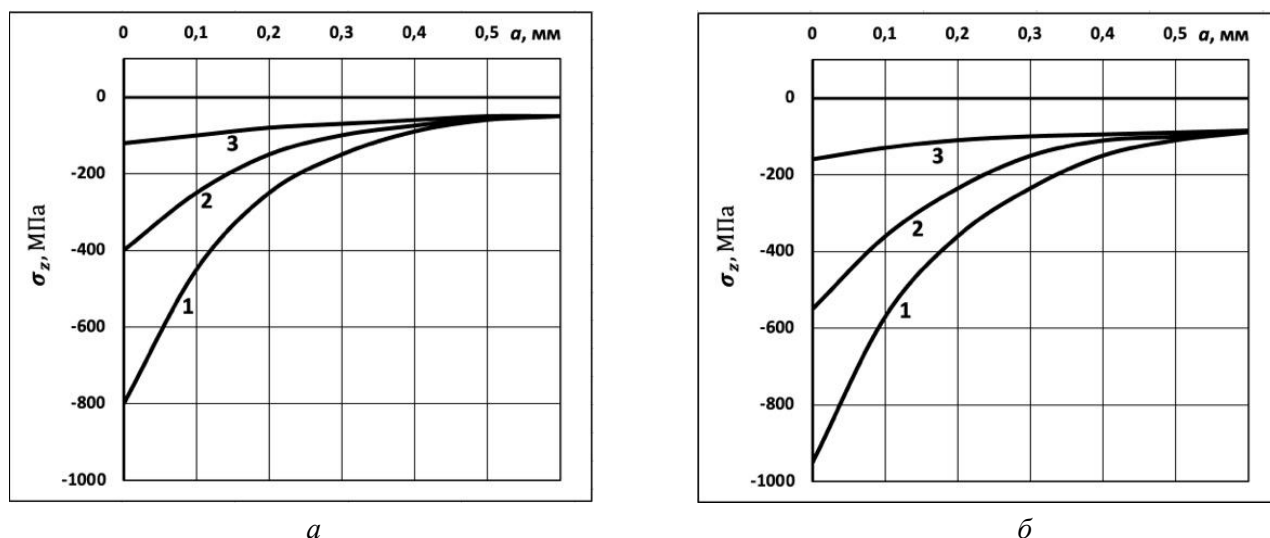


Рис. 3. Осевые σ_z остаточные напряжения в упрочненных роликом образцах с надрезом после ОР1 (а) и ОР2 (б):
1 – $R = 0,3$ мм; 2 – $R = 0,5$ мм; 3 – $R = 1,0$ мм

Испытания неупрочненных и упрочненных образцов на усталость проводились на машине УМП-02 [4], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения предела выносливости образцов σ_{-1} представлены в таблице.

**Результаты определения предела выносливости образцов
с надрезом и остаточных напряжений**

Надрез R , мм	Неупрочн. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочненные образцы						
		Упрочн. обр-ка	σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{\text{пов}}$, МПа	ψ_σ	$t_{\text{кр}}$, мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
0,3	85	OP1	117,5	-783	0,042	1,086	-96	0,339
		OP2	130	-919	0,044	1,010	-123	0,325
0,5	92,5	OP1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366
		OP2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357
1,0	92,5	OP1	110	-126	0,139	1,073	-46	0,380
		OP2	115	-166	0,136	1,035	-62	0,363

Из приведенных данных видно, что с увеличением глубины надреза при одном и том же усилии обкатки роликом приращение предела выносливости упрочненных образцов уменьшается, что объясняется уменьшением сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении. В выстоявших базу испытаний упрочненных образцах при напряжении, равном пределу выносливости, были выявлены нераспространяющиеся трещины усталости, средняя критическая глубина $t_{\text{кр}}$ которых для каждой партии образцов представлена в таблице. Необходимо отметить, что выявленные в настоящем исследовании значения $t_{\text{кр}}$ соответствуют установленной ранее зависимости (1) критической глубины нераспространяющейся трещины усталости от размеров опасного сечения образцов и деталей в работах [5, 6]:

$$t_{\text{кр}} = 0,0216D_1, \quad (1)$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали (см. рис. 1, а).

Оценка влияния обкатки роликом на предел выносливости упрочненных образцов проводилась по двум критериям: по остаточным напряжениям на поверхности надреза $\sigma_z^{\text{пов}}$ и по среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ [7], вычисленным по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов, равной критической глубине $t_{\text{кр}}$ нераспространяющейся трещины усталости. Из представленных в таблице данных следует, что коэффициент влияния упрочнения ψ_σ по критерию остаточных напряжений на поверхности надреза $\sigma_z^{\text{пов}}$ изменяется более чем в три раза, и в связи с данным фактом использовать указанный критерий при оценке предела выносливости поверхностно упрочненных деталей нецелесообразно. Коэффициент влияния упрочнения $\bar{\psi}_\sigma$ по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ изменяется в проведенном исследовании в 1,2 раза, что обосновывает использование на практике критерия, базирующегося на среднеинтегральных остаточных напряжениях $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, вычисленных по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов, равной критической глубине $t_{\text{кр}}$ нераспространяющейся трещины усталости.

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует два важных вывода. Во-первых, для сохранения эффекта упрочнения с увеличением глубины надреза необходимо увеличивать толщину поверхностного слоя со сжимающими остаточными напряжениями, а во-вторых, для оценки предела выносливости поверхностно упрочненных деталей неприемлем критерий остаточных напряжений на поверхности надреза, при этом рекомендуется использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 53. С. 32–42.
2. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: межвузовский сборник. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 3. С. 88–95.

3. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. Самара: СГАУ, 2011. № 3 (27). Ч. 3. С. 171–174.
4. Филатов Э.Я., Павловский В.Э. Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. Киев: Наукова Думка, 1985. 92 с.
5. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение 1. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение, 1988. № 8. С. 22–26.
6. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Вакулук В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. 125 с.
7. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение, 1986. № 8. С. 29–32.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Титов В.А., инженер-исследователь, **Гречухин А.В.**, ассистент, **Ахмедов Н.А.**, ассистент, **Шаговская В.С.**, инженер

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: idoleef7855@mail.ru*

Представлены результаты поверхностной обработки твердосплавной фрезерной пластины TC40PT абразивными инструментами, наполненными алмазом детонационного синтеза. Отмечены перспективы использования данного наполнителя для полировки компонентов микроэлектроники.

Ключевые слова: абразивные инструменты, полировка, алмаз детонационного синтеза

APPLICATION OF SUPERHARD MATERIALS FOR SURFACE TREATMENT OF CARBIDE MATERIALS

Titov V.A., research engineer, **Grechukhin A.V.**, assistant, **Akhmedov N.A.**, assistant, **Shakhovskaya V.S.**, engineer

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: idoleef7855@mail.ru*

The results of surface treatment of a TC40PT carbide milling plate with abrasive tools filled with detonation synthesis diamond are presented. The prospects of using this filler for polishing microelectronics components are also noted.

Keywords: abrasive tools, polishing, detonation synthesis diamonds

В настоящее время технология полирования и шлифования твердосплавных материалов преимущественно основана на применении природного и синтетического алмаза. Постоянно увеличивающийся рост производства пресс-форм, сменных твердосплавных пластин и высокоточного измерительного оборудования требует соответственного увеличения производства абразивных материалов, которые обеспечат текущие потребности на рынке. Современные методы синтеза алмазов, такие как НРНТ (high pressure high temperature) и CVD-выращивание, хотя и являются самыми распространенными методами, но обусловлены использованием катализаторов и длительного воздействия высоких давлений и температур [1]. Данная проблема может быть решена использованием алмаза детонационного синтеза в качестве абразивного материала.

Цель работы – обосновать целесообразность применения алмазов детонационного синтеза в ультразвуковой обработке твердых сплавов и провести испытания на полировальную способность. Ультрадисперсные алмазы (УДА) синтезируются путем взрывного разложения мощных смесей взрывчатых веществ (ВВ) с отрицательным кислородным балансом в неокислительной среде. Такие алмазы характеризуются поликристалличностью, химической стойкостью алмазного ядра и активностью периферической оболочки [2].

С целью проведения исследования были разработаны опытные образцы полировальных инструментов для ультразвуковой полировки, наполненные алмазом детонационного синтеза. Способность обрабатывать твердосплавные материалы определяли путем поверхностной обработки фрезерной пластины TC40PT при помощи ультразвукового прибора YJCS-5B (рис. 1). TC40PT является прочным сплавом для высокопроизводительной обработки углеродистой и легированной стали, стального литья, коррозионностойких сталей при тяжелых условиях резания.

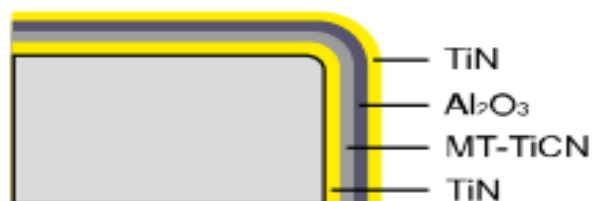


Рис. 1. Ультразвуковой аппарат для полировки YJCS-5B и вид покрытия твердосплавного материала

В течение заданного времени, равного 10 мин, пластина подвергалась ультразвуковому воздействию опытного образца полировального инструмента (рис. 2). Выбран максимальный уровень воздействия (28 КГц). Полировка осуществлялась сухим трением без использования СОЖ.



Рис. 2. Процесс полировки твердосплавной пластины

После испытания были сделаны микроснимки испытуемой поверхности при помощи металлографического инвертированного микроскопа Olympus GX51 (рис. 3, 4).

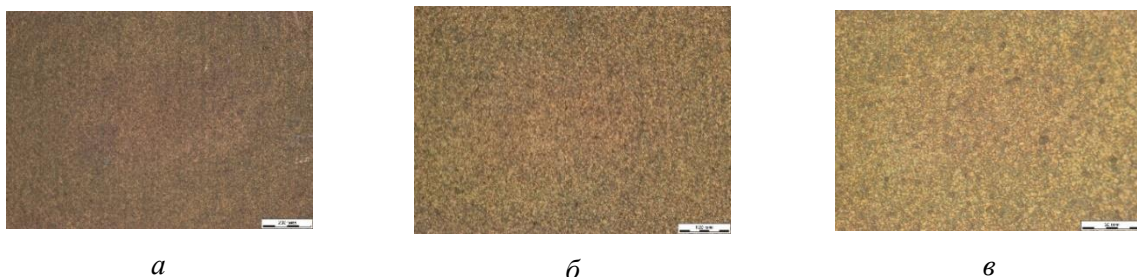


Рис. 3. Микроснимки поверхности фрезерной пластины до ультразвуковой полировки: а – 100-кратное увеличение; б – 200-кратное увеличение; в – 500-кратное увеличение

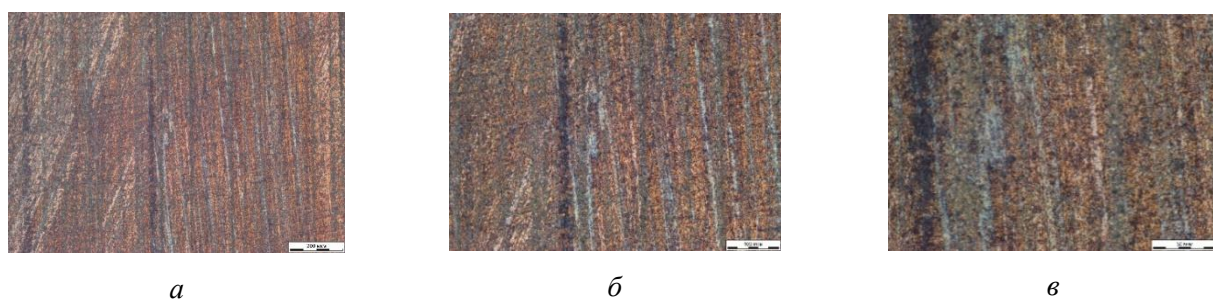


Рис. 4. Микроснимки обработанной поверхности: а – 100-кратное увеличение; б – 200-кратное увеличение; в – 500-кратное увеличение

Измерение шероховатости поверхности осуществлялось мобильным профилографом TIME TR110 (см. таблицу).

Результаты измерения шероховатости по зонам

№ зоны испытания	Материал фрезерной пластины	Название образца	Шероховатость Ra, мкм
1	Сплав марки TC40PT	Без воздействия	2,56
2		Полировальный инструмент с алмазом фракции 14/10 (P1500)	0,35

Преимущества полировальных систем, содержащих алмаз детонационного синтеза, представлены ниже:

1. Ультрадисперсность алмазов обеспечивает минимальные значения шероховатости поверхности обрабатываемого материала – не выше $Ra = 0,04$ мкм.

2. Минимальный удельный расход алмазов при ультразвуковой полировке.

3. Полировальные системы с использованием алмазов позволяют повысить качество и конкурентоспособность отечественной полировальной продукции и обеспечивают технологичность полирования труднообрабатываемых материалов [3].

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что полировальные системы (ПС), содержащие алмаз детонационного синтеза, могут не только применяться в финишном высокопрецизионном полировании твердых сплавов, но и повысить качество обрабатываемой поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Формы существования углерода. Их получение и применение / С.А. Оглезнева, Л.М. Гревнов, И.В. Жигалова, Н. А. Легостаева, А.Г. Шурик. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2003. 88 с.
2. Волков К.В., Даниленко В.В., Елин В.И. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ. Челябинск: Физика горения и взрыва, 1990. 123 с.
3. Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойства и применение // Успехи химии. 2001. 70 (7). С. 703–705.

ВЛИЯНИЕ ШАГА ЗУБЬЕВ ФРЕЗЫ И ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОЛИКАРБОНАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Унянин А.Н., д.т.н., профессор, Димухаметов И.З., аспирант

*Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Российская Федерация
E-mail: iln-d@yandex.ru*

Приведены результаты численного моделирования технологических параметров процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната при различных комбинациях шага зубьев фрезы, глубины и скорости резания без применения и с применением ультразвуковых колебаний (УЗК). Установлено влияние шага зубьев фрезы и элементов режима фрезерования на технологические параметры процесса, в том числе силы трения и резания и температуры. Использование УЗК позволяет снизить главную составляющую силы резания, средние и максимальные значения температур в зоне контакта стружки с зубом и в зоне контакта зуба с заготовкой.

Ключевые слова: фрезерование, моделирование, поликарбонат, силы, температуры, ультразвуковые колебания

INFLUENCE OF MILLING TEETH PITCH AND CUTTING MODE ELEMENTS ON TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PROCESSING POLYCARBONATE WORKPIECES WITH ULTRASONIC VIBRATIONS USING

Unyanin A.N., Grand PhD in Engineering Sciences., Professor,
Dimukhametov I.Z., PhD student

*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation
E-mail: iln-d@yandex.ru*

The results of numerical modeling of technological parameters polycarbonate workpieces milling process with various combinations milling teeth pitch, depth and cutting speed without and with ultrasonic vibrations (USV) using are presented. Influence of milling teeth pitch and milling mode elements on the technological parameters of process including friction and cutting forces and temperatures are fixed. Using USV allows to reduce main component of cutting force, average and maximum temperature values in the chip-tooth and chip-workpiece contact areas.

Keywords: milling, modelling, polycarbonate, forces, temperature, ultrasonic vibrations

Широко распространенным методом обработки заготовок деталей из поликарбоната является фрезерование цилиндрическими и концевыми фрезами. Однако влияние шага зубьев фрезы и режима обработки на технологические параметры процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната с использованием УЗК не установлено. Это затрудняет разработку рекомендаций по выбору условий и режима фрезерования.

Используемые физические и математические модели и программное обеспечение для расчета технологических параметров фрезерования [1, 2] позволяют учесть расположение и взаимное перемещение источников тепловыделения в зоне деформирования и в зонах контакта зуба фрезы со стружкой и заготовкой, наложение тепловых импульсов от отдельных зубьев, зависимость теплофизических свойств участвующих в теплообмене объектов и механических свойств материала заготовки от температуры. Расчет сил резания и трения выполняется по формулам, полученным из зависимостей [3, 4].

Моделирование выполнено для встречного фрезерования заготовки фрезой, изготовленной из твердого сплава Т5К10 и имеющей передний угол $\gamma = 10^\circ$ [5]. Варьировали элементами режима фрезерования: скоростью резания $V = 6$ и 12 м/с; глубиной резания $t = 0,5$ и 1 мм. Использовали шаг зубьев $t_z = 12,6$ мм, соответствующий фрезе диаметром

20 мм, имеющей 5 зубьев [5], а также $t_z = 31,4$ мм. План численного моделирования составлен по принципу многофакторного планирования экспериментов и включает в себя различные комбинации элементов режима и шага зубьев фрезы (табл. 1). В экспериментах 1–8 подача на зуб фрезы являлась неизменной и составляла $S_z = 0,12$ мм/зуб. Для исследования влияния параметра S_z проведен эксперимент № 9, условия которого отличаются от эксперимента № 3 не только шагом зубьев, но и параметром S_z , равным 0,36 мм/зуб.

Таблица 1

План численного моделирования

№ эксперимента	Шаг зубьев фрезы t_z , мм	Глубина резания t , мм	Скорость резания V , м/с	Скорость подачи V_s , м/мин
1	12,6	0,5	6	3,44
2	31,4	0,5	6	1,38
3	12,6	1	6	3,44
4	31,4	1	6	1,38
5	12,6	0,5	12	6,88
6	31,4	0,5	12	2,75
7	12,6	1	12	6,88
8	31,4	1	12	2,75
9	31,4	1	6	2,75

При выборе для моделирования механических и теплофизических характеристик обрабатываемого материала ориентировались на характеристики поликарбоната: температура плавления 220–230 °С; предел прочности при растяжении – 65–70 МПа; удельная теплоемкость – 1090–1255 Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности – 0,20 Вт/(м·К); плотность – 1,20 г/см³ (при 20 °С) [6]. При обработке без применения СОЖ коэффициент трения в зоне контакта поликарбоната с зубом фрезы приняли равным $\mu = 0,4$ [6].

Моделирование выполнили полагая, что под влиянием УЗК частотой 18600 Гц и амплитудой 10 мкм коэффициент трения и предел текучести поликарбоната снижаются в 1,5 раза и на 15 % соответственно [7, 8].

При обработке без УЗК температура в зоне резания достигает значительной величины в первые моменты времени контакта зуба фрезы с заготовкой и увеличивается в последующие моменты. В последний момент времени значения сил резания и трения, мощности и плотности источников тепловыделения становятся выше, так как зуб вступает в контакт с материалом заготовки, в меньшей степени нагретым в результате работы предшествующих зубьев. Также в этот момент времени значения средней и максимальной температур в зонах контакта зуба фрезы со стружкой и заготовкой выше, чем в предыдущий (предпоследний) (табл. 3). Поэтому параметры процесса фиксировали в момент времени перед выходом зуба фрезы из контакта с заготовкой и в предпоследний, меньший последнего на 8×10^{-5} с. Результаты, зафиксированные в последний момент времени, в таблицах представлены в числителе, в предпоследний – в знаменателе.

Силы трения и резания и мощности источников тепловыделения при обработке заготовок из поликарбоната на порядок ниже, чем при фрезеровании заготовок из металлов [1, 2, 9], что объясняется более низким пределом прочности этого материала и низкой температурой размягчения.

В предпоследний момент времени контакта зуба при увеличении t_z при скорости резания $V = 6$ м/с, сила трения F_1 и главная составляющая силы резания P_z незначительно увеличиваются, при $V = 12$ м/с – незначительно уменьшаются при увеличении t_z . Поэтому при увеличении t_z средние и максимальные значения температур в зоне контакта стружки с зубом T_1 и в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 увеличиваются, но незначительно (табл. 2).

Поликарбонат имеет низкий коэффициент теплопроводности, поэтому на удалении от обрабатываемой поверхности температура заготовки увеличивается незначительно. Во всех

экспериментах на расстоянии 25 мкм от обрабатываемой поверхности температура заготовки не превышает 45 °С. При увеличении шага t_z температура заготовки также увеличивается.

Таким образом, увеличение шага зубьев при неизменной подаче на зуб приводит к незначительному увеличению температур в зонах контакта зуба фрезы со стружкой и заготовкой и в поверхностном слое заготовки.

Таблица 2

Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и шаге зубьев при обработке без применения УЗК

№ эксперимента	Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба F_1 , Н	Сила трения зуба о заготовку F_2 , Н	Главная составляющая силы резания P_z , Н	Температура в зоне контакта стружки с зубом T_1 , К		Температура в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 , К		Температура заготовки на расстоянии 25 мкм от обрабатываемой поверхности T_3 , К
				средняя	максимальная	средняя	максимальная	
1	6,9/5,4	0,69/0,62	6,1/4,9	530/515	709/681	514/501	560/542	306/304
2	6,9/5,5	0,69/0,63	6,1/4,9	537/521	714/689	519/515	563/560	321/317
3	9,7/7,2	0,69/0,62	8,3/6,3	596/573	826/792	587/567	654/624	312/310
4	9,7/7,3	0,68/0,62	8,3/6,3	599/578	831/797	593/576	659/637	323/320
5	7,0/4,3	0,69/0,62	6,1/3,9	716/656	1056/972	748/703	864/807	295/294
6	6,8/4,2	0,68/0,62	6,0/3,9	718/661	1059/978	753/713	868/821	300/298
7	10/5,9	0,69/0,62	8,6/5,2	800/723	1235/1059	822/766	961/892	310/305
8	9,8/5,8	0,68/0,62	8,4/5,2	801/724	1234/1129	823/769	962/895	316/306
9	22,6/10,6	0,69/0,64	18,7/9,0	708/605	1100/895	957/864	997/909	306/304

Примечание: F_1 , F_2 , P_z – силы, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы

При $t = 1$ мм по сравнению с $t = 0,5$ мм увеличиваются: главная составляющая силы резания P_z на 36–39 %, среднее значение температуры T_1 – на 10–12 %, среднее значение температуры T_2 – на 10–14 %. На силу трения F_2 изменение глубины резания влияния не оказывает. Зафиксированы более высокие значения максимальных температур T_1 и T_2 , а также температуры заготовки T_3 на глубине 25 мкм, причем параметр T_3 в большей степени увеличивается при скорости резания $V = 12$ м/с.

Увеличение скорости резания приводит к уменьшению значения силы трения F_1 и силы P_z (на 17–18 %) в предпоследний момент времени контакта зуба. Однако вследствие увеличения мощностей источников тепловыделения температуры в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой увеличиваются: средние температуры T_1 и T_2 на 33–35 и 38–45 %; максимальные температуры – на 16–17 и 46–54 % соответственно. Скорость резания оказывает большее влияние на среднее и максимальное значение температуры T_2 .

Температура в поверхностном слое заготовки снижается с увеличением скорости V . Это можно объяснить тем, что для обеспечения равной подачи на зуб $S_z = 0,12$ мм с увеличением V увеличивается и скорость подачи V_s (см. табл. 1). Следовательно, источники тепловыделения перемещаются относительно поверхности заготовки с большей скоростью, поэтому на расстоянии 25 мкм от обработанной поверхности она нагревается в меньшей степени.

Численный эксперимент № 9 отличается от эксперимента № 3 тем, что увеличен шаг фрезы при неизменной скорости подачи V_s (см. табл. 1). Поэтому подача на зуб в эксперименте № 9 выше и составляет $S_z = 0,36$ мм. При большем значении шага зубьев поверхностные слои заготовки остывают более продолжительное время, поэтому в предпоследний момент времени контакта зуба с заготовкой выше значения силы трения и резания и мощности источников тепловыделения. В последний момент времени контакта зуба сила трения F_1 и сила P_z в эксперименте № 9 более чем в два раза выше, чем в эксперименте № 3. Увеличение сил и мощностей источников тепловыделения приводит к повышению средних температур T_1 и T_2 на 19 и 63 %; максимальных температур T_1 и T_2 – на 33 и 52 % соответственно.

В данном случае в большей степени изменяется среднее и максимальное значение температуры T_2 . Температура заготовки в эксперименте № 9 ниже, чем в эксперименте № 3.

Таким образом, увеличение шага зубьев фрезы при неизменной скорости подачи и большей подачи на зуб приводит к увеличению сил резания и трения и контактных температур и снижению температуры в поверхностном слое заготовки.

При обработке с применением УЗК влияние шага зубьев фрезы и элементов режима на параметры процесса не отличается от соответствующего влияния при обработке без применения колебаний. Однако при обработке с УЗК параметры, характеризующие теплосиловою напряженность процесса, существенно ниже (см. табл. 3).

Сила трения F_1 меньше на 37–46 % при скорости резания $V = 6$ м/с и более чем в два раза – при $V = 12$ м/с; сила трения F_2 меньше в среднем в два раза; сила P_z меньше на 13–24 % при $V = 6$ м/с и на 39–41 % при $V = 12$ м/с.

Средние температуры T_1 и T_2 при обработке с УЗК ниже на 20–24 и 16–21 % при $V = 6$ м/с и на 28–30 и 27–36 % при $V = 12$ м/с. Максимальные температуры T_1 и T_2 при обработке с УЗК уменьшились на 27–30 и 14–23 % при скорости $V = 6$ м/с и на 35–45 и 29–31 % при $V = 12$ м/с соответственно. Силы и температуры в большей степени снижаются при большем значении глубины резания $t = 1$ мм.

Температура заготовки T_3 при фрезеровании с наложением колебаний также уменьшается, но не более чем на 10 градусов.

Таблица 3

Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и шаге зубьев фрезы при обработке с применением УЗК

№ эксперимента	Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба F_1 , Н	Сила трения зуба о заготовку F_2 , Н	Главная составляющая силы резания P_z , Н	Температура в зоне контакта стружки с зубом T_1 , К		Температура в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 , К		Температура заготовки на расстоянии 25 мкм от обрабатываемой поверхности T_3 , К
				средняя	максимальная	средняя	максимальная	
1	4,3/2,7	0,34/0,32	5,3/3,4	424/418	515/505	432/427	464/456	302/300
2	4,2/2,7	0,34/0,32	5,3/3,4	426/421	518/509	436/435	466/467	311/309
3	5,2/2,8	0,34/0,32	6,4/3,6	454/443	571/557	462/452	501/488	308/306
4	5,3/2,8	0,34/0,32	6,6/3,6	457/447	573/560	466/459	506/497	312/310
5	2,9/2,9	0,34/0,32	3,7/3,7	514/485	686/645	544/521	610/583	296/294
6	2,9/2,8	0,34/0,32	3,7/3,6	516/487	688/648	549/528	614/592	300/298
7	4,0/3,7	0,34/0,32	5,0/4,6	555/512	675/715	583/528	662/629	306/304
8	4,0/3,8	0,34/0,32	5,0/4,7	556/513	774/715	586/555	666/631	310/305
9	12,3/6,1	0,34/0,33	15,0/7,4	510/458	705/640	655/520	685/640	299/296

Примечание: F_1, F_2, P_z – силы, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы

Применение УЗК при условиях, соответствующих численному эксперименту № 9, позволяет снизить: силу трения F_1 на 44 %; силу резания P_z в два раза; средние значения температур T_1 и T_2 на 28 и 32 %; максимальные значения температур T_1 и T_2 на 36 и 31 %; температуру заготовки T_3 на 8 градусов.

Выводы

1. Установлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования, в том числе сил и температур в зонах контакта стружки с зубом фрезы и зуба с заготовкой, в зависимости от шага зубьев и элементов режима фрезерования.
2. Увеличение шага зубьев при неизменной подаче на зуб приводит к незначительному повышению контактных температур и температуры поверхностного слоя заготовки;

одновременное увеличение шага и подачи на зуб фрезы сопровождается значительным (до 52–63 %) увеличением средних и максимальных значений контактных температур и снижением температуры заготовки.

3. При увеличении глубины резания увеличиваются: на 36–39 % – главная составляющая сила резания; на 10–14 % – средние значения контактных температур; температура поверхностного слоя заготовки.
4. Изменение скорости резания с 6 до 12 м/с при одновременном увеличении скорости подачи приводит к уменьшению главной составляющей силы резания на 17–18 % и увеличению средних контактных температур на 33–45 %.
5. Использование УЗК позволяет снизить главную составляющую силу резания на 13–41 %, средние значения контактных температур на 16–36 %, максимальные значения контактных температур на 14–45 %, причем силы и температуры снижаются в большей степени при больших значениях глубины и скорости резания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Унянин А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 220–235.
2. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
3. Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 56–61.
4. Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. Практические расчеты параметров резания при точении // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 67–70.
5. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др. / Под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987. 846 с.
6. Смирнова О.В., Ерофеева С.Б. Поликарбонаты. М.: Химия, 1975. 288 с.
7. Нерубай М.С., Штриков Б.Л., Калашников В.В. Ультразвуковая механическая обработка и сборка. Самара: Самар. кн. изд-во, 1995. 191 с.
8. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М.Ф. Вологин, В.В. Калашников, М.С. Нерубай, Б.Л. Штриков. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
9. Унянин А.Н., Чуднов А.В. Исследование параметров процесса при обработке фрезами с различным шагом между зубьями // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 12 (38). С. 21–26.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Унянин А.Н., д.т.н., профессор, **Чуднов А.В.**, аспирант

*Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Российская Федерация
E-mail: chudnov73ru@gmail.com*

Предложены зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи от поверхностей заготовки, инструмента и стружки к смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и воздуху, используемые при расчете температур, возникающих в процессе фрезерования. Выполнено численное моделирование температурного поля при фрезеровании заготовок из алюминиевого сплава Д16 и поликарбоната. Выявлены закономерности изменения температур и коэффициентов теплоотдачи в зависимости от номера последовательно работающего зуба фрезы и скорости резания при фрезеровании. Установлено, что усиление охлаждающего действия внешней среды приводит к незначительному уменьшению температур. Снижение коэффициента трения при подаче СОЖ приводит к снижению сил трения и резания и температур на площадках контакта стружки с зубом фрезы и зуба с заготовкой.

Ключевые слова: фрезерование, температурное поле, теплоотдача

THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL PROPERTIES ON THE TEMPERATURE FIELD FORMED DURING MILLING

Unyanin A.N., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Chudnov A.V.**, PhD student

*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation
E-mail: chudnov73ru@gmail.com*

The dependences for determining the heat transfer coefficients from the surfaces of the workpiece, tool and chip to the lubricating coolant (COOLANT) and air used in calculating temperatures arising during milling are proposed. Numerical simulation of the temperature field during milling of workpieces made of aluminum alloy D16 and polycarbonate is performed. The patterns of temperature changes and heat transfer coefficients depending on the number of the consistently working tooth of the milling cutter and the cutting speed during milling are revealed. It has been established that an increase in the cooling effect of the external environment leads to a slight decrease in temperatures. A decrease in the coefficient of friction when applying coolant leads to a decrease in friction and cutting forces and temperatures at the contact sites of the chip with the tooth of the cutter and the tooth with the workpiece.

Keywords: milling, temperature field, heat transfer

Для расчета температур, возникающих в процессе фрезерования, необходимо знать коэффициенты теплоотдачи от поверхностей заготовки, инструмента и стружки к смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и воздуху. В процессе резания поверхности заготовки, инструмента и стружки нагреваются до высоких температур, при которых возникает кипение СОЖ, причем режимы кипения и теплоотдачи зависят от температуры поверхности, которая заранее не известна. Кроме того, процесс фрезерования характеризуется переменными условиями. Это обуславливает изменение сил диспергирования и трения, коэффициента утолщения стружки и длины ее контакта с передней поверхностью зуба фрезы (режущей пластины) и переменность плотностей тепловых потоков и температур [1], следовательно, и коэффициентов теплоотдачи на траектории контакта. Поэтому при предварительном расчете коэффициентов может быть получена значительная погрешность, которая окажет влияние на достоверность результата расчета температур.

Схема процесса теплообмена в зоне фрезерования представлена на рисунке. Рассматриваются три источника тепловыделения: в зоне стружкообразования с плотностью источника

тепловыделения q_g ; на передней поверхности зуба с плотностью q_1 и размером l_1 , равным длине контакта стружки с передней поверхностью зуба; на задней поверхности зуба плотностью q_2 и размером l_2 , равным длине контакта задней поверхности с заготовкой.

При подаче СОЖ поливом с ней обмениваются теплотой поверхности NK , V_2V и VL пластины (зуба), MD и MN стружки, CD , V_3F , BC и FF_1 заготовки, а также поверхности KQ и LS корпуса фрезы (см. рисунок). Остальные поверхности заготовки обмениваются теплотой с окружающим воздухом. При схематизации процесса теплообмена принимаем во внимание часть корпуса фрезы ($KQWSLR$ при двумерной постановке задачи теплового взаимодействия), примыкающую в пластине. Границы QW и WS корпуса фрезы считаем теплоизолированными.

При определении коэффициентов теплоотдачи учитывается, что в зоне резания присутствует смесь СОЖ с воздухом. Для расчета коэффициента теплоотдачи при контакте СОЖ на водной основе с обработанной поверхностью V_3F заготовки, разогретой до температуры, превышающей температуру насыщения, получены следующие зависимости:

$$\alpha_k = 170 \cdot (T_s - 373)^{1,86} \quad \text{при } 378 \leq T_s \leq 393 \text{ К}; \quad (1)$$

$$\alpha_k = 3,33 \cdot 10^6 (T_s - 373)^{-1,43} \quad \text{при } 393 \leq T_s \leq 508 \text{ К}; \quad (2)$$

$$\alpha_k = 3 \cdot 10^3 \quad \text{при } T_s > 508 \text{ К}; \quad (3)$$

где T_s – температура поверхности, К.

Предложены зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи для всех поверхностей, обменивающихся теплотой с внешней средой.

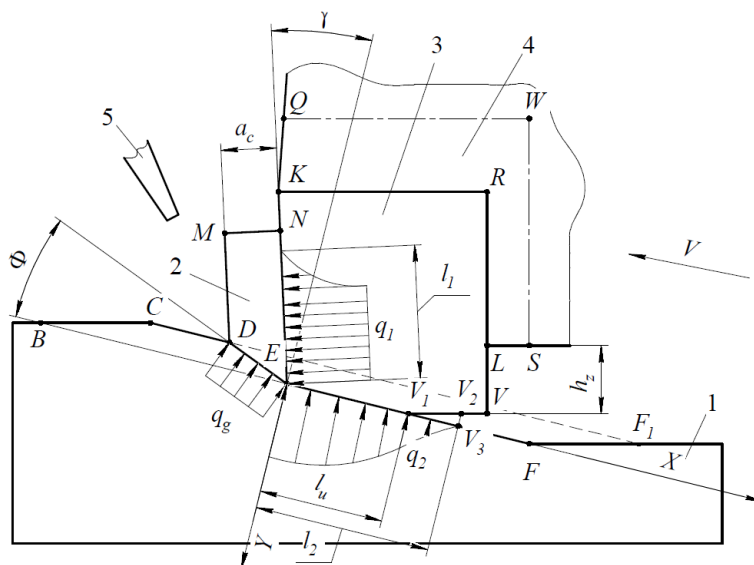


Схема теплообмена в зоне контакта зуба фрезы с заготовкой:

1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – пластина; 4 – корпус фрезы; 5 – сопло для подачи СОЖ

Для расчета параметров процесса использовали программное обеспечение, реализующее расчет температурного поля с применением метода конечных элементов [1]. В методику численного расчета дискретных аналогов уравнений теплопроводности, а также в блоки самого программного обеспечения были включены дополнительные изменения, позволяющие выполнить расчет коэффициентов теплоотдачи [2, 3].

Численное моделирование температурного поля выполнили при фрезеровании заготовок из алюминиевого сплава Д16 и поликарбоната. Условия моделирования поля при обработке алюминиевого сплава следующие: диаметр фрезы 20 мм; скорость резания $V = 7$ м/с; скорость подачи $V_s = 8,6$ м/мин; глубина резания $t = 1$ мм. Условия при обработке заготовок из поликарбоната: диаметр фрезы 20 мм; $V = 7$ и 15 м/с; $t = 0,5$ мм.

Параметры процесса фиксировали при работе 1-го, 10-го и 35-го зубьев фрезы.

Исследования показали, что с увеличением числа последовательно работающих зубьев температура деформируемого слоя заготовки заметно увеличивается, а коэффициент теплоотдачи от поверхностей CD и V_3F заготовки при работе 10-го зуба выше, чем 1-го. Это объясняется тем, что при работе 1-го зуба температура поверхности в зоне резания не достигает температуры насыщения СОЖ, а значит, теплоотдача при кипении СОЖ отсутствует. Коэффициенты теплоотдачи поверхностей стружки DM и MN на порядок выше, чем коэффициенты поверхностей заготовки CD и V_3F . Это связано с тем, что скорость движения СОЖ относительно поверхностей зуба и стружки зависит от скорости вращения фрезы (скорости резания) и выше, чем скорость движения жидкости относительно поверхностей заготовки. При этом температура поверхностей NK и VL зуба не достигает температуры насыщения СОЖ, поэтому теплоотдача при кипении отсутствует, а значения коэффициента теплоотдачи поверхностей NK и VL зуба примерно в пять раз ниже, чем коэффициента теплоотдачи поверхностей стружки DM и MN .

При изменении доли СОЖ в воздушно-жидкостной смеси коэффициенты теплоотдачи также изменяются. При уменьшении доли СОЖ с 0,75 до 0,25 коэффициенты теплоотдачи снижаются в 3–5 раз.

Изменение коэффициентов теплоотдачи не оказывает значительного влияния на температурное поле. Это можно объяснить тем, что при уменьшении доли СОЖ в смеси к моменту входа в зону контакта с заготовкой очередного зуба фрезы поверхностные слои заготовки остывают в меньшей степени. Это приводит к повышению температуры деформируемого слоя материала заготовки и снижению интенсивности напряжений и мощностей источников тепловыделения. Поэтому уменьшаются значения коэффициентов теплоотдачи, что способствует увеличению температур; уменьшение мощностей источников тепловыделения способствует их снижению. В результате действия этих двух факторов при уменьшении коэффициентов теплоотдачи с уменьшением доли СОЖ температура заготовки и температуры в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой увеличиваются незначительно.

При обработке с большей скоростью резания ($V = 15$ м/мин) заготовок из поликарбоната, имеющего значительно меньшие прочностные характеристики, зафиксированы меньшие значения температур на площадках контакта стружки с зубом и зуба с заготовкой. Температура деформируемого слоя при работе 35-го зуба всего на 4 градуса превышает температуру окружающей среды, что объясняется низким значением коэффициента теплопроводности этого материала. Остальные закономерности идентичны для процесса фрезерования заготовок из алюминиевого сплава Д16. Изменение скорости резания при обработке поликарбоната не отражается на значении коэффициента теплоотдачи поверхностей CD и VF заготовки, а коэффициенты теплоотдачи поверхностей DM и MN стружки и NK и VL зуба значительно увеличиваются – более чем в два раза. Температуры на площадках контакта стружки с зубом и зуба с заготовкой, а также температура обработанной поверхности V_3F заготовки с увеличением скорости заметно увеличиваются. Температура поверхности DM стружки при значении доли СОЖ 0,75 снижается с увеличением скорости резания, что можно объяснить увеличением коэффициента теплоотдачи от этой поверхности с увеличением скорости.

СОЖ, находящаяся в зоне резания, помимо охлаждающего действия реализует также смазочное, приводящее к снижению коэффициентов трения. Зависимости для расчета сил резания и трения, возникающих в процессе резания [4], содержат в качестве аргументов коэффициент трения по напряжению текучести и коэффициенты трения стружки о переднюю поверхность инструмента и его задней поверхности о заготовку. При резании с применением СОЖ заготовок из металлов эти коэффициенты можно принять равными 0,3; при резании без применения СОЖ – 0,5 [4]. В процессе моделирования температурного поля коэффициенты трения принимали равными 0,3 и 0,4, что соответствует использованию жидкостей, обладающих различными смазочными свойствами.

С увеличением коэффициента трения от 0,3 до 0,4 увеличиваются силы трения стружки о переднюю поверхность зуба и зуба о заготовку и главная составляющая силы резания,

что приводит к повышению значений мощностей тепловых потоков. Силы трения повышаются на 30–33 %; главная составляющая силы резания – на 10 %; контактные температуры в зонах контакта стружки с зубом и зуба с заготовкой увеличиваются на 10–13 % соответственно. При обработке заготовок из сплава Д16 температура заготовки на расстоянии 100 мкм от обработанной поверхности увеличивается на 5 %.

Таким образом, варьирование коэффициентов трения оказывает значительное влияние на контактные температуры и меньшее – на температуру заготовки. Следовательно, с целью снижения температур в зоне резания следует использовать СОЖ, обладающие высокими смазочными свойствами.

Таким образом, было установлено следующее:

– усиление охлаждающего действия внешней среды при увеличении доли СОЖ в воздушно-жидкостной смеси приводит к незначительному уменьшению температур;

– увеличение коэффициента трения приводит к увеличению сил трения и резания и температур на площадках контакта стружки с зубом фрезы и зуба с заготовкой, поэтому с целью снижения температур следует использовать СОЖ, обладающие высокими смазочными свойствами.

Также в результате численного моделирования были выявлены закономерности изменения температур и коэффициентов теплоотдачи в зависимости от номера последовательно работающего зуба фрезы и скорости резания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Унянин А.Н., Журавлёв А.С. Исследование параметров процесса и температурного поля при обработке фрезами с различным шагом между зубьями // *Машиностроение и техносфера 21 века: сборник трудов 18-й международ. НТК в г. Севастополе 13–19 сентября 2021 г.* Донецк: ДонНТУ, 2021. С. 549–552.
2. Унянин А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // *Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева.* 2017. № 2 (41). С. 220–235.
3. Резников А.Н., Резников Л.А. *Тепловые процессы в технологических системах.* М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
4. Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // *Вестник машиностроения.* 2008. № 7. С. 56–61.

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Федотов Д.Д.¹, аспирант, **Яреско С.И.**^{1,2}, д.т.н., зав. лабораторией СФ ФИАН

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² Самарский филиал ФИАН, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: dnsfdtv62@gmail.com

Рассмотрены основные области применения лазерной ударной обработки, схемы ее реализации, достоинства метода. Сделаны выводы о перспективности использования данной технологии для повышения эксплуатационных характеристик изделий машиностроения.

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, машиностроение, авиастроение, усталостная прочность, сжимающие напряжения, коррозия, микроструктура

APPLICATION OF LASER SHOCK PEENING FOR STRUCTURAL STEEL STRENGTHENING

Fedotov D.D.¹, PhD student, **Yaresko S.I.**^{1,2}, Grand PhD in Engineering Sciences

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

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

E-mail: dnsfdtv62@gmail.com

The main areas of application of laser shock peening, schemes for its realization and the advantages of the method are considered. Conclusions about the perspective of using this technology for raising the operational characteristics of mechanical engineering products are made.

Keywords: laser shock peening, mechanical engineering, aircraft industry, fatigue strength, compressive stress, corrosion, microstructure

Лазерная ударная обработка (ЛУО) – эффективный метод обработки поверхности, имеющий большие преимущества перед методами механического наклепа сталей и сплавов, например, ультразвуковой или дробеструйной обработкой (ДО). ЛУО обеспечивает глубину залегания остаточных напряжений сжатия, в 4–5 раз превышающую таковую при дробеструйной обработке. Важным преимуществом ЛУО является возможность обработки труднодоступных, например, для ДО областей изделий: кромок, углублений, надрезов, пазов и т. д. Одним из достоинств ЛУО является также возможность обработки изделий сложной формы и по заданному контуру. Процесс ЛУО может быть интегрирован в производственную линию с высокой степенью автоматизации.

Основные направления применения ЛУО:

- образование глубоких остаточных напряжений сжатия и изменение микроструктуры, обеспечивающие существенное увеличение усталостной прочности (долговечности);
- увеличение стойкости металлических материалов к коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением, что связано с изменением микроструктуры и наведенными остаточными напряжениями сжатия;
- гибка, формовка металлов, микроструктурирование для улучшения трибологических и других свойств поверхности, лазерная ударная маркировка;
- улучшение свойств материалов для медицинских имплантатов.

Во время ЛУО металл подвергается чисто механическому воздействию, термическим воздействием лазерного излучения на структуру материала можно пренебречь.

Цель работы – на конкретных примерах из различных отраслей машиностроения показать возможности метода ЛУО для повышения эксплуатационных характеристик изделий из конструкционных сталей.

За последние два десятилетия процесс ЛУО всесторонне изучался в достаточно широких пределах, но в основном это – исследования зарубежных ученых. В настоящее время работы по лазерному наклепу проводятся в большинстве развитых и развивающихся стран (США, Франция, Германия, Великобритания, Испания, Италия, Япония, Ирландия, Китай, Южная Корея, Бразилия, Мексика и др.).

Основные области применения ЛУО:

– авиастроение: в производстве авиационных двигателей военного и гражданского назначения и иных элементов конструкций самолетов и вертолетов, испытывающих действие циклических нагрузок [1]. Увеличение срока службы авиационных компонентов, критичных к усталости: бортовых переборок, узлов крепления крыла, тормозных элементов, шасси и т. д.; повышение надежности сварных соединений; противодействие усталости, усталости вследствие фреттинг-коррозии, трещинообразованию от коррозии под напряжением для крепежных элементов и отверстий под крепеж; повышение выносливости приводных механизмов вертолетов. В рамках общенациональной (США) программы повышения усталостной прочности деталей ГТД технология ЛУО успешно применяется ведущими производителями ГТД (Pratt&Whitney, GE Aviation, SNECMA, Rolls-Royce, MTU Aeroengines);

– энергетика: ЛУО лопаток газовых и паровых турбин энергетических установок;

– медицина: обработка имплантатов для снижения вероятности отторжения;

– атомная энергетика: обработка корпусов и сварных швов энергетических реакторов различного типа для повышения стойкости материалов к коррозионному растрескиванию [2];

– машиностроение: обработка деталей машин и сварных швов для увеличения усталостной долговечности.

Лазерному ударному упрочнению подвергаются прежде всего изделия из алюминиевых, титановых и никелевых сплавов, сталей различного состава и назначения. Проводятся эксперименты по обработке керамических материалов.

Как правило, ЛУО проводится на режимах, представленных в таблице [3, 4].

Режимы обработки при лазерном ударном упрочнении

Режимы обработки	Диапазон значений
Длина волны, нм	532, 1064
Длительность импульса, нс	10–45
Энергия импульса, Дж	0,5–12
Размер пятна, мм	2–5
Степень перекрытия, %	25–75

Основные области применения ЛУО конструкционных сталей тесно связаны с производством деталей машин и техники авиационной и автомобильной промышленности.

Наиболее важной областью применения ЛУО является авиастроение, так как надежность и прочность деталей конструкции самолета напрямую влияет на безопасность авиатранспорта, на безопасность людей. Одним из критичных элементов, определяющим надежность двигателя, являются шестерни трансмиссии (сталь AISI 9310, российский аналог – сталь 12Х2Н3МА), имеющие, по данным [5], недостаточную усталостную прочность при изгибе. Последнее примерно в 32 % случаев приводит к отказу зубчатых колес. Традиционные методы обработки поверхности, например ДО, не обеспечивают глубину залегания остаточных напряжений сжатия более 0,25 мм, а глубокая прокатка неприменима для обработки кромок и углов изделия.

Метод лазерного ударного упрочнения позволяет избежать этих недостатков. Реализация ЛУО зоны корневого скругления зуба шестерни трансмиссии авиадвигателя показана на рис. 1.



Рис. 1. Процесс ЛУО основания шейки зуба шестерни трансмиссии [5]

Изучение распределения остаточных напряжений, вызванных ЛУО, методами конечно-элементного моделирования (рис. 2) и рентгеноструктурного анализа показывает, что ЛУО является эффективным средством повышения усталостной прочности цилиндрической шестерни при изгибе и обеспечивает требуемое распределение остаточных напряжений на корневом скруглении зуба шестерни. Вследствие этого усталостный ресурс зубьев шестерни при изгибе существенно увеличивается. После ЛУО в области скругления корня зубьев преобладают остаточные напряжения сжатия величиной более 680 МПа на глубине, почти в 4 раза большей, чем при традиционных методах обработки поверхности.

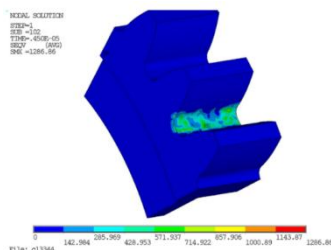


Рис. 2. Распределение напряжений по Мизесу на корневой шейке шестерни [5]



Рис. 3. ЛУО лопаток ротора двигателя

В ряде случаев циклические нагрузки предъявляют высокие требования к элементам аэрокосмического изделия. Такие нагрузки, действующие длительное время, могут привести к зарождению трещин и их распространению вглубь материала. Типичным объектом, испытывающим многоцикловую усталость, являются лопатки ротора авиационного двигателя (материал: жаропрочная сталь 09X14H19B2BP1 или жаропрочный сплав ХН35ВТ), работающие при температурах 600–700 °С. При использовании лазерного наклепа (рис. 3) для повышения усталостной прочности ресурс лопаток двигателя стоимостью 30–40 тыс. \$ США за штуку может быть увеличен в три-пять раз [1].

Там, где необходимы высокая прочность и хорошая коррозионная стойкость изделия, широко используются нержавеющие стали. Обеспечение низкого уровня шума и высокая устойчивость к коррозии обуславливают применение нержавеющей стали AISI 316L (русский аналог – сталь 03X16H15M3) для изготовления подшипников, но при этом из-за низкого предела текучести контактная усталость этого материала существенно ограничивает надежность изделия [6].

Исследование контактной усталости храпового механизма из нержавеющей стали 316L при высокой циклической нагрузке выявили, что остаточные растягивающие напряжения тесно связаны с контактной усталостью и вызывают рост усталостных трещин [6]. Снижение остаточных напряжений растяжения позволяет уменьшить изнашивание при циклическом нагружении.

Результаты исследования контактной усталости при качении изделий из нержавеющей стали 316L после ЛУО представлены на рис. 4. При анализе контактной поверхности после испытаний на многоцикловую усталость установлено, что остаточные напряжения сжатия после ЛУО являются основным фактором повышения стойкости к износу при контактной усталости; также одним из факторов улучшения устойчивости к контактной усталости при

качении служит наблюдаемое повышение микротвердости поверхности после ЛУО. При этом упрочняющий эффект ЛУО чувствителен к уровню контактного напряжения. Так, например, при увеличении контактного напряжения с 715 до 790 МПа эффект упрочнения существенно снижается (см. рис. 4), кроме того, при увеличении энергии излучения до 4 Дж и 5 Дж наблюдается изменение механизма разрушения поверхности контакта, причины которого требуют специального исследования.

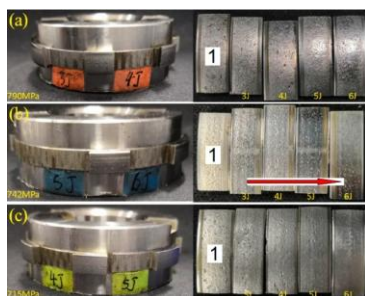


Рис. 4. Изношенная поверхность после испытания на контактную усталость при различных контактных напряжениях:

a – контактное напряжение 790 МПа; *б* – контактное напряжение 742 МПа;
в – контактное напряжение 715 МПа; 1 – необработанная поверхность,
 по стрелке – увеличение энергии лазерного излучения при ЛУО от 3 до 6 Дж

Используя метод лазерного ударного упрочнения, можно доработать технологию изготовления ряда толстостенных деталей, например коленчатого вала, проводя обработку критических участков, действующих как источники напряжений, а именно отверстий, выступов, скруглений, предварительно промоделировав распределение остаточных напряжений в проблемных местах изделия (рис. 5) [7]. Возникающие после ЛУО остаточные напряжения сжатия снижают вероятность зарождения трещины, замедляют скорость ее роста и продлевают срок службы компонентов. Таким же образом для достижения повышенной усталостной прочности и долговечности можно обрабатывать большинство деталей, ослабленных концентраторами напряжений.

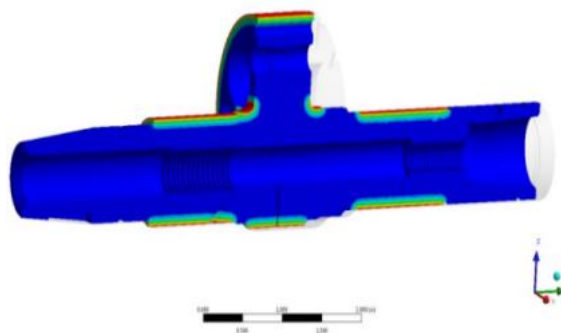


Рис. 5. Моделирование упрочнения коленчатого вала методом ЛУО

ЛУО может быть также использована для упрочнения сварного шва при сварном соединении двух деталей из конструкционной стали, тем самым увеличивая срок его службы.

Достаточно часто неравномерность микроструктуры и остаточных напряжений в сварном соединении делают его восприимчивым к воздействию повышенных температур и агрессивных сред. В этих условиях ЛУО позволяет повысить прочность сварного соединения, а также увеличить степень измельчения зерна и сбалансировать остаточные напряжения в рабочей зоне. На примере сварного соединения двух листов из мартенситной стали показано [8], что ЛУО приводит к повышению однородности микроструктуры сварного шва, при этом размер зерен уменьшается почти на 17 % в сварном шве и на 24 % в основном металле. Изменение размера зерен в зоне термического влияния наиболее существенно, оно составляет почти

45 % и значительно улучшает механические свойства сварного соединения. Лазерная ударная обработка оказывает существенное влияние на напряженное состояние сварного соединения [8]. Остаточные напряжения сжатия по осевой линии сварного шва увеличиваются почти втрое по сравнению с первоначальным значением от минус 63 МПа до минус 183 МПа для сварного шва в нормальном направлении, что непосредственно улучшает качество сварного соединения. Таким образом, ЛУО после сварки – это удобный способ изменить микроструктуру и сбалансировать остаточное напряжение.

В заключение отметим, что лазерное ударное упрочнение успешно используется во многих отраслях машиностроения с целью создания в поверхностном слое деталей поля остаточных напряжений сжатия для увеличения сопротивления росту усталостных трещин. Лазерный наклеп оказывает существенное влияние на улучшение физико-механических свойств материалов, повышение стойкости изделий к коррозии и механическому износу при контактной усталости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tolga Bozdana A. On the mechanical surface enhancement techniques in aerospace industry – a review of technology // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2005. V. 77(4). Pp. 279–292. <http://dx.doi.org/10.1108/00022660510606349>
2. Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology / Y. Sano, K. Akita, K. Masaki et al. // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. 2006. V. 1(3). Pp. 161–166. DOI: 10.2961/jlmn.2006.03.0002.
3. Effect of laser shock peening on corrosion resistance of 316L stainless steel laser welded joint / D. Liu, Y. Shi, J. Liu, L. Wen // *Surface and Coatings Technology*. 2019. V. 378. 124824. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.048>
4. Effect of laser shock peening on high cycle fatigue properties of aluminized AISI 321 stainless steel / W. Li, H. Chen, W. Huang et al. // *International Journal of Fatigue*. 2021. V. 147. 106180. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106180>
5. Effect of laser shock peening on bending fatigue performance of AISI 9310 steel spur gear / C. Peng, Yu. Xiao, Y. Wang, W. Guo // *Optics & Laser Technology*. 2017. V. 94. Pp. 15–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.03.017>
6. The effect of rolling contact fatigue properties on 316 stainless steel under laser shock peening // F. Doi, W. Cheng, Yu. Zheng, X. Chen // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 141. 107159. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107159>
7. Modern Laser Peening for Material Surface Enhancement / M.A. Kattoura, S.C. Bovid, D.F. Lahrman, and A.H. Clauer // in book: *Shot Peening – A Dynamic Application and Its Future*; 6th edition, Chapter 14. Publisher: Metal Finishing News, 2021. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/353295685_Modern_Laser_Peening_for_Material_Surface_Enhancement_-_6th_Edition_2021
8. Effects of LSP on micro-structures and residual stresses in a 4 mm CLAM steel weld joints / X. Chen, Yu. Fang, Zhang et al. // *Fusion Engineering and Design*. 2015. V. 94. Pp. 54–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.03.019>

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

Хакимзянова С.И., студент, **Никишина Г.В.**, к.т.н.

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация
E-mail: khakimsiiln04@mail.ru*

Рассматривается применение технологий Интернета вещей в сфере образования, в частности для реализации виртуальных лабораторий в различных областях, что позволит обучающимся изучать свою профессиональную отрасль в интерактивном ключе. Дается описание структуры виртуальной лаборатории и ее основных составляющих.

Ключевые слова: Интернет вещей, виртуальная лаборатория, машиностроение, образование, умные устройства, учебные программы

APPLICATION OF INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES FOR IMPLEMENTATION OF VIRTUAL LABORATORIES

Khakimzyanova S.I., student, **Nikishina G.V.**, PhD in Engineering Sciences

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation
E-mail: khakimsiiln04@mail.ru*

The article examines the application of Internet of Things technologies in the field of education, in particular for the implementation of virtual laboratories in various fields, which will allow students to study their professional field in an interactive manner. The structure of the virtual laboratory and its main components are described.

Keywords: Internet of Things, virtual laboratory, mechanical engineering, education, smart devices, educational programs

В эпоху цифровых технологий и повсеместной информатизации образование должно шагать в ногу со временем, используя новейшие достижения и разработки для обучения молодого поколения. Одним из таких перспективных решений является интеграция технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT) в образовательный процесс в различных областях, например, в контексте изучения радиотехники или машиностроения. С развитием Интернета вещей и виртуальной реальности виртуальные лаборатории [6] получили широкое распространение в различных сферах науки и производства. Они используются для проведения различных исследований, обучения, тестирования новых технологий и многого другого.

Использование IoT открывает множество возможностей для создания виртуальных лабораторных сред, которые позволят студентам проводить эксперименты и изучать различные аспекты данной отрасли, не покидая учебного заведения. Виртуальные лабораторные комплексы могут быть оборудованы различными датчиками, собирающими и передающими данные на компьютер, где они будут обрабатываться и анализироваться. Датчики могут быть установлены в различные устройства с целью изучения их работы и влияния на окружающую среду – от измерения уровня шума и вибрации до температуры и влажности. В работе [1] рассматривается опыт внедрения дистанционных лабораторий в образовательный процесс КНИТУ – КАИ, в работах [2–4] авторы рассматривают особенности практической реализации метода диагностики литиевых аккумуляторов на современной элементной базе и микропроцессорных системах, а также возможность применения технологий Интернета вещей для обработки и анализа данных, полученных в процессе работы этой системы. В работе [5] рассматриваются особенности разработки платформы для организации работы систем Интернета

вещей. В данной статье авторами предлагается концепция виртуальных лабораторий на основе IoT, которая позволит студентам изучать свою профессиональную область в интерактивном и инновационном формате.

Интернет вещей – это концепция, согласно которой физические устройства, оснащенные датчиками, программным обеспечением и другими технологиями, могут соединяться и обмениваться данными через интернет [3]. Это позволяет устройствам взаимодействовать друг с другом и с людьми, открывая новые возможности для автоматизации и оптимизации различных процессов [2–5].

Актуальность IoT заключается в том, что помогает улучшить эффективность и удобство повседневной жизни, а также открывает новые возможности для бизнеса, позволяя компаниям собирать данные о своих продуктах и процессах, чтобы оптимизировать их работу. Кроме того, IoT играет важную роль в развитии концепции «Индустрии 4.0», где автоматизация и цифровизация производства становятся ключевыми факторами конкурентоспособности.

Виртуальная лаборатория (ВЛ) представляет собой компьютерную модель [6], которая имитирует работу реального оборудования или процесса. Одна из главных особенностей ВЛ заключается в том, что она позволяет проводить эксперименты без использования реального оборудования. Это может быть полезно в случаях, когда эксперимент является слишком дорогим, опасным или невозможным в реальной жизни. Кроме того, виртуальная лаборатория позволяет быстро и точно проводить исследования, так как она не требует длительного времени на подготовку и проведение эксперимента. Также она может быть использована для обучения студентов и специалистов, так как позволяет им изучать работу реального оборудования, не выходя из учебного заведения.

Однако у виртуальных лабораторий есть и свои недостатки. Во-первых, они могут быть менее точными, чем реальные эксперименты, так как не учитывают все возможные факторы и условия. Во-вторых, некоторые из них требуют наличия мощного компьютера или хорошего интернет-соединения для работы. Тем не менее виртуальные лаборатории продолжают развиваться и становятся все более популярными в различных областях науки и промышленности. Они уже сегодня используются для проведения исследований, обучения и тестирования новых технологий, и в будущем их роль будет только возрастать.

На данный момент времени уже существует огромное количество виртуальных лабораторий, которые применяются в обучении студентов различных профилей, но большинство из них используют данные уже проведенных исследований или физические законы и формулы. Внедрение элементов IoT позволяет использовать актуальные реальные данные, передающиеся в реальный момент времени с различных датчиков, сенсоров и т. д. Более того, умные устройства позволяют работать с большими объемами данных, в последующем обрабатывая и анализируя их, предоставляя более точные данные. Самым главным преимуществом использования технологии IoT является получение максимально реальных моделей, близких по параметрам к настоящим объектам, что приводит к минимальным погрешностям в вычислениях и более качественным экспериментам.

Виртуальная лаборатория на основе IoT для обучения студентов различных профилей должна состоять из нескольких основных частей, чтобы обеспечить полноценное погружение в процессы производства и управления. На рисунке представлена возможная структура виртуальной лаборатории.

Центральный контроллер является ключевым компонентом ВЛ на основе IoT для обучения в сфере машиностроения. Этот контроллер выполняет роль основного управляющего устройства, которое координирует работу всех других устройств в системе. Виртуальный центральный контроллер обычно моделируется в виде программного обеспечения, имитирующего функции реального промышленного PLC (программируемого логического контроллера) или SCADA (системы сбора и анализа данных).

Вот несколько ключевых аспектов виртуального центрального контроллера:

1. Логика управления: Виртуальный центральный контроллер предоставляет средства для программирования логики управления производственными процессами. Студенты могут

создавать виртуальные программы, которые эмулируют управление различными устройствами, такими как моторы, клапаны, насосы и другие.

2. Визуализация процессов: Центральный контроллер обычно имеет возможность визуализации производственных процессов. Это позволяет студентам наблюдать изменения параметров, состояний устройств и других важных аспектов производственных операций.

3. Сбор данных: Центральный контроллер отвечает за сбор данных от датчиков и других устройств в лаборатории. Он обрабатывает и анализирует эти данные, что позволяет студентам изучать влияние различных факторов на производственные процессы.

4. Управление сетью: Виртуальный центральный контроллер обеспечивает управление сетью устройств в лаборатории, включая установку соединений, маршрутизацию данных и обмен информацией между устройствами.



Структурная схема ВЛ

Виртуальный центральный контроллер играет решающую роль в эмуляции и управлении производственными процессами в ВЛ, предоставляя студентам возможность погрузиться в реалистичную среду промышленной автоматизации для обучения.

Датчики предоставляют информацию о различных параметрах производственных процессов и окружающей среды. Различные типы датчиков, такие как датчики температуры, давления, влажности, уровня жидкости и другие, используются для непрерывного мониторинга и сбора данных. Данные, полученные от датчиков, передаются на центральный контроллер для анализа и принятия решений. Например, датчики температуры могут предоставить информацию о текущем состоянии процесса, а датчики давления могут помочь в контроле за рабочим давлением в системе. Данные от датчиков позволяют студентам изучать и анализировать производственные процессы, а также принимать решения на основе полученной информации. Таким образом, наличие разнообразных датчиков в ВЛ является необходимым для обеспечения эффективного функционирования системы и обучения студентов основам автоматизации и контроля производственных процессов.

Актуаторы в ВЛ отвечают за выполнение определенных действий на основе данных, полученных от датчиков и обработанных центральным контроллером. Актуаторы могут быть представлены различными устройствами, такими как моторы, клапаны, насосы и другие механизмы, способные изменять состояние системы или производственного процесса. Например, если датчики температуры обнаруживают увеличение температуры выше заданного порога, центральный контроллер может передать команду актуатору в виде клапана для открытия системы охлаждения и снижения температуры. Таким образом, актуаторы играют важную роль в автоматизации процессов и обеспечивают реакцию системы на изменения в окружающей среде. Использование актуаторов в ВЛ позволяет студентам изучать принципы работы различных устройств и механизмов, а также практиковаться в управлении производственными процессами. Таким образом, актуаторы являются неотъемлемой частью

структуры ВЛ и способствуют более глубокому пониманию автоматизации и контроля производственных процессов.

Подключение к интернету позволяет передавать данные между устройствами, осуществлять удаленное управление системой и обеспечивать доступ к данным из любой точки с мобильного устройства или компьютера. Также подключение открывает возможности для использования технологий Интернета вещей (IoT), что позволяет создавать умные системы с автоматизацией и удаленным управлением. С помощью интернет-подключения студенты могут изучать принципы работы IoT устройств, а также разрабатывать и тестировать различные сценарии управления системой через интернет.

Облачное хранилище данных в ВЛ играет ключевую роль в обработке, анализе и хранении данных, собранных от датчиков и других устройств. Облачное хранилище позволяет студентам сохранять данные о производственных процессах, мониторить изменения в реальном времени и проводить анализ для выявления тенденций и паттернов. Преимущества облачного хранилища данных включают в себя возможность доступа к данным из любой точки с помощью интернета, гибкость в масштабировании хранилища в зависимости от объема данных, высокую степень защиты данных и автоматизированное резервное копирование информации. Облачное хранилище данных также обеспечивает возможность совместной работы над данными для студентов и преподавателей, облегчая обмен информацией и совместное решение задач. Кроме того, использование облачного хранилища позволяет увеличить эффективность работы с данными и ускорить процесс принятия управленческих решений на основе анализа данных.

Виртуальная модель производственного процесса как компьютерная симуляция реального процесса включает в себя виртуальные объекты, механизмы, устройства и системы, которые отражают реальные объекты и процессы. Студенты могут использовать виртуальную модель для изучения работы производственного оборудования, оптимизации производственных процессов, проведения тестирования новых концепций и технологий, а также для обучения по принципу «обучение на практике». Виртуальная модель производственного процесса позволяет студентам экспериментировать с различными параметрами процесса, наблюдать изменения в реальном времени, анализировать данные и принимать управленческие решения. Таким образом, виртуальная модель помогает студентам приобрести практические навыки и опыт работы с производственными системами, не выходя из класса или дома.

Реальный пример ВЛ на основе IoT для изучения работы токарного станка [7] по вышеперечисленной структуре:

1. Виртуальный токарный станок: в лаборатории может быть представлен виртуальный токарный станок, который моделирует процесс обработки деталей на станке. Студенты могут изучать различные операции, такие как нарезка резьбы, точение и фрезерование.

2. Виртуальные датчики: для мониторинга процесса обработки могут использоваться виртуальные датчики, такие как датчики вибрации, температуры и давления. Они позволяют отслеживать состояние станка и детали в реальном времени.

3. Датчики инструмента: для контроля износа и положения режущего инструмента могут быть использованы виртуальные датчики, позволяющие оптимизировать процесс обработки и предотвращать повреждение инструмента.

4. Модель резания: студенты могут изучать процесс резания материала с помощью виртуальной модели, которая позволяет анализировать параметры резания, такие как скорость резания, подача инструмента и глубина резания.

5. Визуализация процесса: с помощью ВЛ можно визуализировать процесс обработки материала на токарном станке, что позволяет студентам наглядно изучать влияние различных параметров на качество и производительность процесса.

Таким образом, данная виртуальная лаборатория дает студентам возможность изучать процессы механической обработки материалов, а также проводить эксперименты с различными параметрами обработки и анализировать данные, полученные от виртуальных датчиков, для оптимизации производственных процессов.

Использование элементов Интернета вещей в виртуальных лабораториях представляет собой важную и перспективную составляющую современного образования в области машиностроения. Интеграция IoT-технологий позволяет создать более реалистичные и эффективные обучающие среды, где студенты могут получить практические навыки и опыт работы с современными производственными системами, что позволяет студентам взаимодействовать с реальными устройствами и оборудованием, проводить эксперименты, анализировать данные и принимать управленческие решения на основе полученных результатов. Это способствует более глубокому и практическому освоению материала, а также развитию ключевых навыков, необходимых для успешной карьеры в различных областях: радиотехнике, робототехнике или области машиностроения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Евдокимов Ю.К., Салахова А.Ш., Кирсанов А.Ю. Опыт внедрения дистанционных автоматизированных учебных лабораторий в КНИТУ – КАИ // Проблемы и перспективы развития наукоемкого машиностроения: Междунар. науч.-техн. конференция, Казань, 19–21 ноября 2013 года. Казань: Казанский гос. ун-т, 2013. С. 357–359.
2. Особенности реализации метода контроля технического состояния литиевых источников тока на основе анализа релаксационных процессов, вызванных изменением нагрузки / Е.С. Денисов, Г.В. Никишина, Р.Р. Енилиев, Т.П. Никишин // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 7 (301). С. 36–43. DOI: 10.14489/td.2023.07.pp.036-043.
3. Денисов Е.С., Никишина Г.В., Нуретдинова Л.Ф. Система удаленного мониторинга технического состояния электрохимических аккумуляторов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII всерос. науч.-техн. конференции, Чебоксары, 07 июня 2019 года. Чебоксары: Чувашский гос. ун-т имени И.Н. Ульянова, 2019. С. 463–464.
4. Енилиев Р.Р. Стенд для измерения и дистанционной обработки сигналов системы релаксационной диагностики литиевых источников тока // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2023: материалы X Междунар. молодежн. науч.-техн. конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 13–15 апреля 2023 года. Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. С. 463–464. – EDN VBDPVB.
5. Егоров Г.И., Денисов Е.С., Шайхразиев Б.Р. Разработка платформы для организации работы систем Интернета вещей // Нигматуллинские чтения – 2023: сборник докл. Междунар. науч. конференции, Казань, 09–12 октября 2023 года. Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2023. С. 435–437. EDN YEMHPO.
6. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде MATLAB-Simulink. М.: Лань-Пресс, 2013. 448 с. ISBN 978-5-8114-1520-5.
7. Тишенина Т.И., Федоров В.Б. Токарные станки и работа на них. М.: Машиностроение, 1990. 144 с.

О ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ В ОБЛАСТИ МЕХАНИКИ

Хохлова О.А.¹, к.т.н., доцент, Пономарёва Е.В.¹, к.ф.-м.н., доцент,
Синельщиков А.В.², к.т.н., доцент

¹ Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань,
Российская Федерация

² Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань,
Российская Федерация
E-mail: астрах@rambler.ru

Рассмотрены расширенные возможности обучающего Web-сайта, модернизированная методика обобщенного решения задач статики и ее применение при изучении родственных дисциплин механического цикла. Показана структура комплекса электронных проблемно-ориентированных обучающих систем (ЭПООС) по теоретической механике. Обсуждена возможность дальнейшего использования комплекса ЭПООС в научно-исследовательской и практической (проектной) работе выпускников.

Ключевые слова: теоретическая механика, дистанционное обучение, генератор учебных заданий, пошаговое решение задач

ABOUT THE APPLICATION OF ELECTRONIC PROBLEM-ORIENTED TRAINING SYSTEM IN THE FIELD OF MECHANICS

Khokhlova O.A.¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Ponomareva E.V.¹, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Sinelschikov A.V.², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

² Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation
E-mail: acmpax@rambler.ru

The expanded capabilities of the educational Web site, the modernized methodology for the generalized solution of statics problems and its application in the study of other disciplines of the mechanical cycle are considered. The structure of a complex of electronic problem-oriented training systems (EPOS) in theoretical mechanics is shown. The possibility of further use of the electronic complex in research and practical (project) work of graduates was discussed.

Keywords: theoretical mechanics, distance learning, generator of educational tasks, step-by-step solution of problems

Авторы разработки обучающего Web-сайта [1] предлагают свой вариант освоения студентам всех форм обучения естественнонаучных и общеобразовательных дисциплин профессионального цикла в технических и строительных вузах. В связи с увеличением объема часов, отводимых на самостоятельную работу, возникла необходимость поиска пути оптимизации процесса усвоения предметов, в первую очередь таких, как теоретическая механика и смежные с ней дисциплины: прикладная механика, сопротивление материалов, теория механизмов и машин, детали машин, строительная механика, гидравлика и другие. Знания законов и принципов теоретической механики необходимы при дальнейшем обучении и для решения профессиональных задач, связанных с расчетом, возведением и эксплуатацией зданий и сооружений, расчетами машин и механизмов различного функционального назначения, летательных аппаратов и т. п.

Освоение предмета теоретической механики значительно осложняется тем, что помимо знаний курса физики школьной программы вчерашний абитуриент должен иметь хорошую

математическую базу и обладать пространственным воображением. Все перечисленные навыки необходимы для физико-математического моделирования реальных объектов исследований, без которых невозможно перейти к упрощенной модели.

В современном образовании школьные программы обучения, как и программы в вузах, претерпевают регулярные реформы. Например, ежегодно увеличивается количество часов на самоподготовку и самостоятельное освоение некоторых тем дисциплин. Черчение во многих школах нередко отсутствуют.

С учетом вышеперечисленного авторы статьи предлагают пути оптимизации обучения как теоретической механике, так и последующим дисциплинам. Для этого был разработан на кафедре «Общетехнические дисциплины и наземный транспорт» АГТУ обучающий Web-сайт [1], на котором размещен комплекс электронных проблемно-ориентированных обучающих систем (ЭПООС), используемый для работы со студентами всех форм обучения. Работа над его размещением началась более 10 лет назад, но его наполнение и модернизация обучающих материалов растет за счет смежных дисциплин и новых запатентованных электронных ресурсов [3–5].

В состав комплекса ЭПООС входят следующие компоненты:

- 1) электронный учебник по теоретической механике [2];
- 2) лекции-презентации, видеоуроки лекционных и практических занятий по теоретической механике, сопротивлению материалов и прикладной механике;
- 3) банк многовариантных заданий по всем основным разделам и темам курса теоретической механики для самостоятельной работы и контроля знаний;
- 4) генератор учебных заданий разной сложности по всем разделам теоретической механики, сопротивления материалов и прикладной механике;
- 5) программы пошагового решения типовых задач по теоретической механике;
- 6) комплекс mws-программ (Maple) [3–5], предназначенных для компьютерного моделирования и автоматизации расчета механических систем с визуализацией результатов и используемых как генераторы заданий заданной сложности с автоматической проверкой результатов;
- 7) учебные пособия и методические указания авторов по теоретической механике, теории механизмов и машин и прикладной механике [7–8];
- 8) обучающий Web-сайт, на котором размещены перечисленные выше компоненты;
- 9) архив сайта, наполнением которого служат следующие виды данных:
 - а) успеваемость студентов за текущий семестр (рейтинговые точки) и за прошедшие годы;
 - б) учебно-методические комплексы дисциплин (УМКД), федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОСы), рабочие программы по теоретической механике и смежным дисциплинам механического профиля, входящим в учебную нагрузку авторов (по мере их ежегодных регулярных изменений);
 - в) новости: информационные письма, подготовка к ежегодной конференции профессорско-преподавательского состава, подготовка к студенческой научно-технической конференции, к олимпиаде по теоретической механике и смежным дисциплинам, материалы интернет-экзаменов, форум.

Не претендуя на оригинальность традиционного Web-сайта, работающего в двух режимах – «Учитель» и «Ученик», отметим, что, используя данный комплекс ЭПООС, студент любой формы обучения может сам выполнить задания для самостоятельной работы любой степени сложности.

Процесс обучения проходит с помощью модулей, разбитых на начальный, тренинг и завершающий этапы. Таким образом, студент сначала тестируется по заданной теме, затем решает пробный вариант задания, пользуясь системой подсказок, и на конечном этапе выполняет свой вариант самостоятельной работы. При этом обучаемый может зайти в приложение Web-сайта, где содержатся списки операций, используемых на начальном этапе. Этот процесс подробно описывался в статьях [6, 10].

Рассмотрим пример выполнения расчетно-графической работы на тему «Определение реакции связей строительной конструкции». На рис. 1 изображена рама с приложенными к ней активными нагрузками (исходная схема).

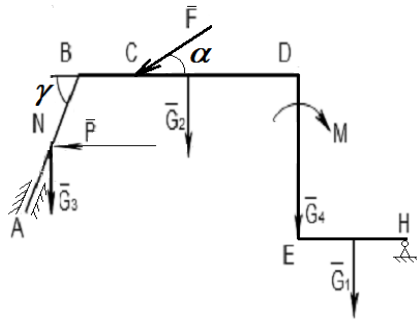


Рис. 1. Исходная схема

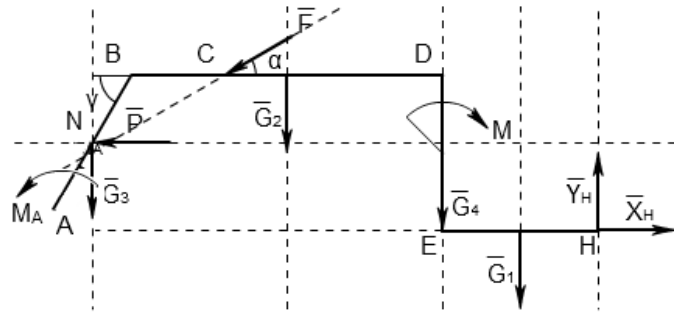


Рис. 2. Расчетная схема

Решая задания в рассматриваемом приложении, студент переключается от исходной схемы (см. рис. 1) к расчетной схеме (рис. 2) по мере необходимости. Исходная схема интерактивна, но неизменна, а расчетная и интерактивна, и изменяема, так как преобразуется на каждом этапе решения.

На первом этапе работы обучаемого с учебным модулем выделяется объект исследования, затем к объекту исследования (в данном примере – к ступенчатой раме) прикладываются реакции связей. На рис. 3 отображен следующий шаг – определяется вид системы сил, действующих на раму. На рис. 4 показан выбор формы уравнений равновесия.

Рис. 3. Выбор вида системы сил

Рис. 4. Выбор формы уравнений равновесия

Расчетный модуль, реализованный в среде математического пакета Maple, позволяет автоматизировать решение системы уравнений равновесия произвольной плоской системы сил, действующей на ступенчатую раму. Фрагмент листинга программы показан в табл. 1.

Таблица 1

Листинг программы

```

restart;
# Задаем исходные данные:
P:=50; F:=60; G1:=10; G2:=20; G3:=30; G4:=40; M:=100;
alpha:=30*Pi/180; EH:=2; ED:=2; CB:=1; CD:=3;
BN:=2; AN:=2; gama:=60*Pi/180;
# Составляем уравнения равновесия:
F[x]:=XH-F*cos(alpha)-P=0;
F[y]:=YH-G1-G2-G3-G4-F*sin(alpha)=0;
M[H]:=G1*EH/2+G4*EH+G2*(EH+(CD+CB)/2)+
+G3*(EH+CB+CD+(AN+BN)*cos(gama)/2)+MA-
M+F*cos(alpha)*ED+F*sin(alpha)*(EH+CD)+
+P*(ED-BN*sin(gama))=0;
# Решаем систему уравнений равновесия:
sols:=solve({F[x], F[y], M[H]}, {XH,YH,MA});
MA:=evalf(eval(MA, sols[1]));
XH:=evalf(eval(XH, sols[2]));
YH:=evalf(eval(YH, sols[3]));
# Выполняем проверку (сумма моментов относительно точки D (см. рис. 4)):
evalf(XH*ED+YH*EH-G1*EH/2-
M+MA+G2*(CB+CD)/2+F*sin(alpha)*CD+G3*(CB+CD+(AN+BN)*cos(gama)/2)-
P*BN*sin(gama));
0

```

Последовательно решая задания на каждом этапе, приходим к завершающему этапу (*анализ результатов решения*). Пользователь делает вывод о равновесии системы сил (если в задании присутствуют неудерживающие связи), а также уточняет действительные направления реакций связей. Завершается работа над решением задач подобного типа выполнением проверки правильности решения, которая заключается в составлении уравнения моментов относительно новой моментной точки.

На примере раздела «Статика» приведем примеры разработанных и используемых в учебном процессе заданий разного уровня сложности (табл. 2).

В заключение отметим, что применение комплекса ЭПООС в учебном процессе имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- 1) повышает интерес обучаемых к дисциплине за счет лучшей наглядности излагаемого материала;
- 2) позволяет адаптировать теоретический материал, упражнения и задания в соответствии с требуемым уровнем сложности и объемом изучения;
- 3) позволяет использовать принципиально новые расчетные индивидуальные задания, предназначенные не только на формирование базовых знаний по теоретической механике и смежным дисциплинам, но и ориентированные на приобретение навыков в решении задач, связанных с будущей профессиональной деятельностью;
- 4) существенно сокращает время преподавателя на разработку и проверку заданий для индивидуальной работы студентов;
- 5) упрощает контроль промежуточных знаний и проведение итоговой аттестации.

Виды разноуровневых типовых заданий по статике

№	Название задания	Расчетная схема
1	Плоская система сил (система сходящихся сил, система параллельных сил, произвольная система сил)	<p>– балка</p> <p>– рама</p>
2	Плоская система сил (продолжение)	<p>– рама с пластиной</p>
3	Плоская ферма	
4	Плоская система тел (тела – рамы, фермы, пластины)	
5	Пространственная система сил (система сходящихся сил, система параллельных сил, произвольная система сил)	
6	Центр тяжести (линия, пластина, объем)	<ul style="list-style-type: none"> └ Уголок 35x35x5 ▬ Полоса 70x10 ▴ Прямоуг. тр-к 30x40 └ Уголок 40x30x5 ┌ Швеллер №5

В настоящее время авторы статьи продолжают работу над расширением возможностей сайта и комплекса ЭПООС в целом. Успешно применяются в учебном процессе многовариантные задания по динамике точки (разобраны случаи движения точки вдоль оси на плоскости с учетом сил сопротивления как степенных функций скорости). Решение сопровождается анимированными двухмерными моделями с построением траектории, скорости и ускорения. Разработанная методика позволила также сформулировать задачи динамического исследования механизмов с несколькими степенями свободы и проверять процесс решения на каждом этапе. Положение звеньев механизма при этом определяется численно. Методика расчетов, несомненно, пригодится для студентов выпускных курсов, магистрантов и аспирантов. Все этапы динамического анализа сопровождаются анимацией моделей.

Правовая защищенность комплекса ЭПООС подтверждена свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ [3–5] и др. Результаты работы по данной теме опубликованы более чем в 50 научных статьях, апробированы на научных международных конференциях в форме очных докладов-презентаций, относящихся к области прикладных задач механики и создания дистанционных обучающих систем по механике.

Эффективность обучающей деятельности Web-сайта была подтверждена экспериментами, проводимыми авторами на базе крупнейших вузов региона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. <http://www.teormech.ru/> [Электронный ресурс].
2. Невенчанная Т.О., Павловский В.Е., Пономарёва Е.В. Электронный интернет-учебник по теоретической механике. Свидетельство об официальной регистрации № 2004612620 / Зарегистр. В реестре программ для ЭВМ 3.12.2004 г.
3. Программа для статического расчета плоской составной конструкции (система двух и более тел). Свидетельство об официальной регистрации № 2010614881 / Пономарёва Е.В., Хохлова О.А., Хохлов А.В. Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 27.07.2010.
4. Программа для статического расчета реакций в опорах твердого тела. Свидетельство об официальной регистрации № 2015612798 / Хохлова О.А., Хохлов А.В., Синельщиков А.В., Пономарёва Е.В. Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 26.02.2015 г.
5. Программа для расчета реакций в опорах пространственной конструкции. Свидетельство об официальной регистрации № 2015663575 / Синельщиков А.В., Пономарёва Е.В., Хохлова О.А., Хохлов А.В. Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 24.12.2015 г.
6. Синельщиков А.В., Пономарёва Е.В. Разработка комплекса универсальных mws-программ (Maple) для компьютерного моделирования и автоматизации расчетов в области механики // Вестник Астрахан. гос. техн. университета. Астрахань: Изд-во АГТУ. 2014. № 1. С. 69–80.
7. Хохлова О.А., Пономарёва Е.В. Теоретическая механика. Статика: учеб. пособие. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2010. 100 с.
8. Курс теоретической механики. Статика: учеб. пособие / Т.О. Невенчанная, О.А. Хохлова, Е.В. Пономарёва, А.В. Хохлов. М.: МГУП им. Ивана Федорова, 2013. 188 с.
9. Хохлова О.А., Хохлов А.В., Пономарёва Е.В. Применение комплекса электронных проблемно ориентированных обучающих систем по теоретической механике // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. № 1 (63). Астрахань: Изд-во АГТУ. 2017. С. 69–76.

ЛАЗЕРНО-АКУСТИЧЕСКИЙ ТОЧЕЧНЫЙ СПОСОБ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И ЕЕ ПОСЛЕДУЮЩИЙ АНАЛИЗ

Шварц И.В., ассистент, **Крылов Я.В.**, студент, **Никифоров С.А.**, старший преподаватель, **Горунов А.Н.**, д.т.н., профессор, **Гильмутдинов А.Х.**, д.т.н., заведующий кафедрой лазерных и аддитивных технологий

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: ivshvarts@kai.ru*

Рассмотрен способ точечной лазерно-акустической обработки нержавеющей стали разной толщины. Разработана и изготовлена методом 3D-печати специальная оснастка. Проведен анализ качества поверхности сварных точек, полученных лазерной и лазерно-акустической обработкой. Отмечается образование дефектов вида «прожог» и усадочной раковины. Разработан алгоритм полуавтоматического измерения площади поверхности сварных точек на основе оптических снимков. Отмечено влияние ультразвуковых колебаний на геометрию сварных точек и проведен соответствующий анализ. Максимальное увеличение площади поверхности сварной точки получено при лазерно-акустической обработке стали толщиной 1,5 мм. Максимальное уменьшение площади поверхности сварной точки получено при лазерно-акустической обработке стали толщиной 2 мм.

Ключевые слова: лазерная сварка, ультразвуковые колебания, нержавеющая сталь

LASER-ACOUSTIC SPOT METHOD OF STAINLESS STEEL SURFACE TREATMENT AND ITS SUBSEQUENT ANALYSIS

Shvarts I.V., research assistant, **Krylov Ya.V.**, bachelor student, **Nikiforov S.A.**, senior lecturer, **Gorunov A.I.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Gilmutdinov A.Kh.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Head of the Department of Laser and Additive Technologies

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation
E-mail: ivshvarts@kai.ru*

The paper discusses the method of laser spot acoustic treatment of stainless steel of different thicknesses. Special equipment was developed and manufactured using 3D printing. An analysis of the surface quality of weld points obtained by laser and laser-acoustic treatment was carried out. The formation of defects such as burns and shrinkage cavity is noted. An algorithm has been developed for semi-automatic measurement of the surface area of weld spots based on optical images. The effect of ultrasonic vibrations on the geometry of weld points was performed and a corresponding analysis was carried out. The maximum increase in the surface area of the weld point obtained by laser-acoustic processing of stainless steel with a thickness of 1.5 mm. The maximum reduction in the area of the weld point obtained by laser-acoustic processing of stainless steel with a thickness of 2 mm.

Keywords: laser welding, ultrasonic vibrations, stainless steel

Лазерная обработка материалов является одним из наиболее предпочтительных технологических процессов в машиностроении. Данный процесс по сравнению с дуговыми процессами обладает рядом преимуществ, такими как высокая плотность мощности в пятне, высокая скорость обработки, возможность сваривания разнородных материалов. Более того, одним из популярным и стратегических направлений развития лазерных технологий являются аддитивные технологии.

В настоящее время инженерами и конструкторами активно ведутся пути и способы улучшения качества сварных соединений. Одним из таких направления является применение ультразвуковых колебаний (УЗК) как источника дополнительного воздействия на жидкую ванну расплава [1, 2].

Уже известны некоторые способы и схемы введения ультразвуковых колебаний [3]. Утверждается, что за счет дополнительных вибраций возможно влиять на физико-механические свойства обрабатываемых материалов, а также на геометрию сварных швов [4]. Ввиду разнообразия схем подвода ультразвуковых колебаний, а также конструктивных особенностей волноводов существует необходимость поиска оптимального решения, обеспечивающего стабильное формирование сварного шва повышенного качества.

В данной работе исследуется влияние ультразвуковых колебаний на геометрию сварной точки, а именно на площадь ее поверхности. В качестве образцов использовались металлические пластины из материала AISI 316L (русский аналог: 03X17H14M3). Размеры пластин: длина – 100 мм, ширина – 50 мм, толщина – 1,5 мм и 2 мм.

Нагрев осуществлялся с помощью иттербиевого волоконного лазера ЛС-6-К производства фирмы IPG Photonics. Ультразвуковое воздействие проводилось с помощью излучателя Ланжевена мощностью 100 Вт и частотой 40 кГц.

С помощью метода 3D-печати была изготовлена специальная оснастка, учитывающая особенности конструкции ультразвукового излучателя. Неподвижный контакт между излучателем и металлической пластиной обеспечен через отверстия с помощью болтов и гаек. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

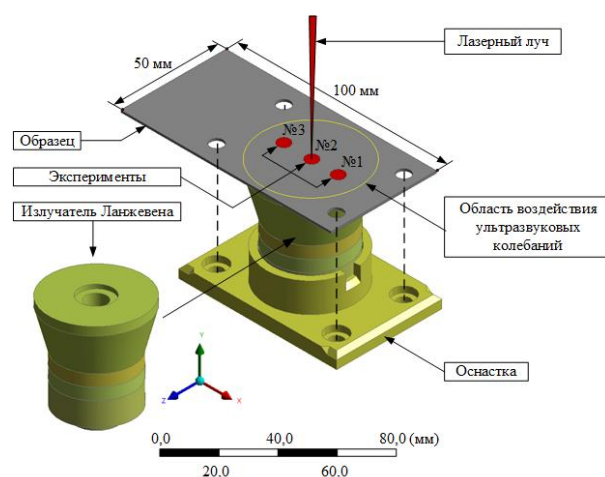


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для каждой из пластин в области воздействия УЗК было проведено по три эксперимента с ультразвуковым воздействием и без него согласно режимам, представленным в таблице.

На рис. 2. показаны оптические снимки поверхности сварных точек, полученных методом лазерной и лазерно-акустической обработки для металлической пластины толщиной 1,5 мм.

Как видно из рис. 2, б, г, в некоторых экспериментах как с применением ультразвука, так и без него, в центре сварной точки наблюдается дефект – усадочная раковина. При этом для эксперимента № 2 без УЗК в центре сварной точки видна образовавшаяся усадочная раковина, в то время как для этого же эксперимента, но с применением УЗК, данный дефект не наблюдается.

Параметры режима нагрева

Толщина, мм	Эксперимент №	Мощность, Вт	Время воздействия, с	Диаметр лазерного пятна, мм
1,5	1	1625	4	3
	2	1875	3,5	
	3	1375	4,5	
2	1	2000	4	
	2	2250	3,5	
	3	1750	4,5	

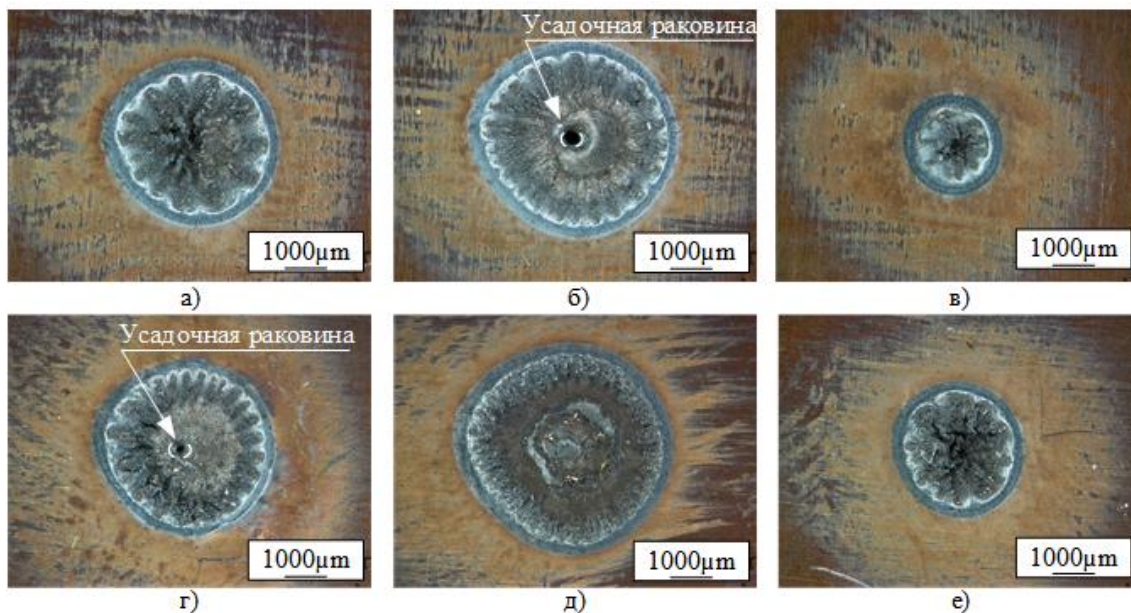


Рис. 2. Оптические снимки сварных точек:

a – эксперимент № 1 без УЗК толщина 1.5 мм; *б* – эксперимент № 2 без УЗК толщина 1.5 мм;
в – эксперимент № 3 без УЗК толщина 1.5 мм; *г* – эксперимент № 1 с УЗК толщина 1.5 мм;
д – эксперимент № 2 с УЗК толщина 1.5 мм; *е* – эксперимент № 3 с УЗК толщина 1.5 мм

На рис. 3 представлены оптические снимки поверхности сварных точек, полученных методом лазерной и лазерно-акустической обработки для металлической пластины толщиной 2,0 мм.

Как видно из рис. 3, во всех экспериментах с и без ультразвукового воздействия дефект вида усадочная раковина отсутствует. Однако для эксперимента № 2 с УЗК (рис. 3, *д*) отмечен дефект вида «трещина». Это может быть связано с вибрациями, которые во время кристаллизации ванны расплава могли привести к растрескиванию.

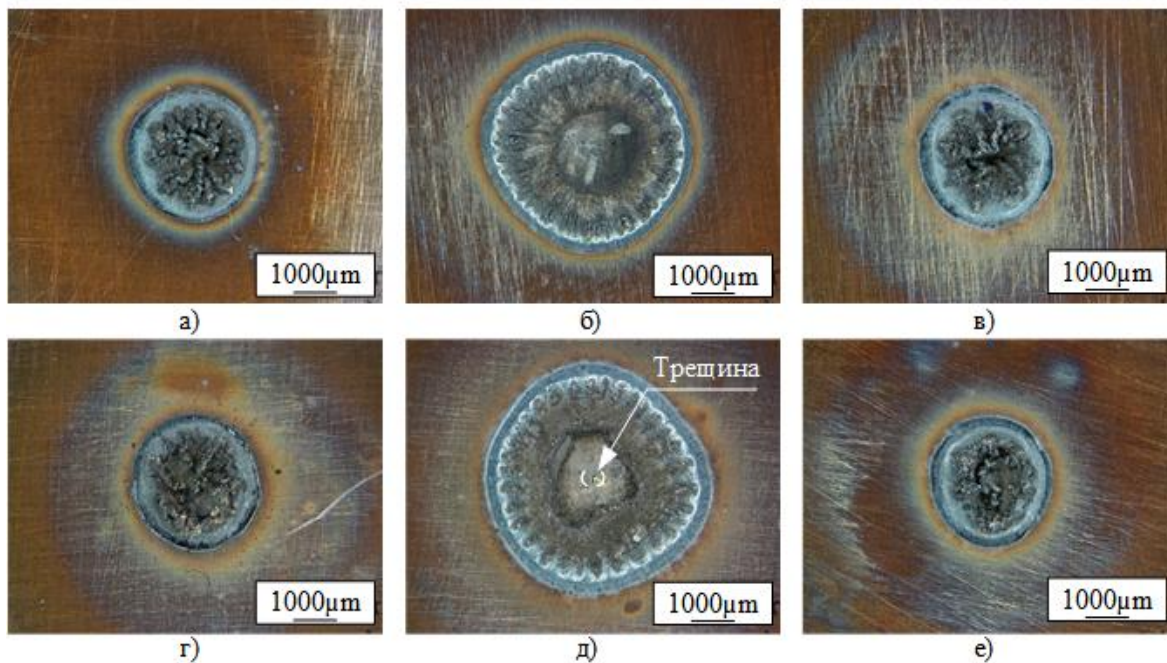


Рис. 3. Оптические снимки сварных точек:

a – эксперимент № 1 без УЗК толщина 2.0 мм; *б* – эксперимент № 2 без УЗК толщина 2.0 мм;
в – эксперимент № 3 без УЗК толщина 2.0 мм; *г* – эксперимент № 1 с УЗК толщина 2.0 мм;
д – эксперимент № 2 с УЗК толщина 2.0 мм; *е* – эксперимент № 3 с УЗК толщина 2.0 мм

На рис. 4 представлен графики относительной разности между площадью поверхности ванны расплава, полученной лазерным и лазерно-акустическим способом нагрева.

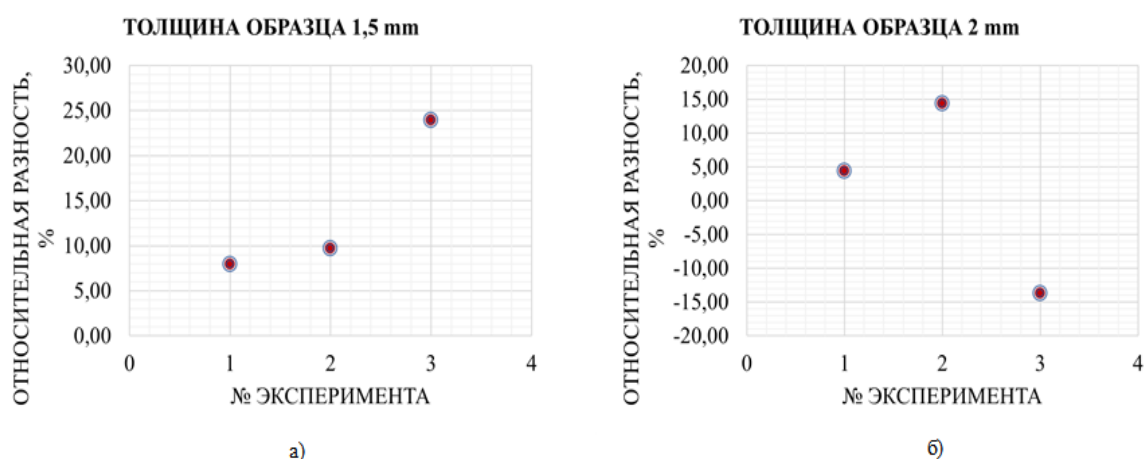


Рис. 4. Сравнительный анализ площадей сварных точек:

а – толщина 1,5 мм; б – толщина 2,0 мм

Как показано на рис. 4, а, для пластины толщиной 1,5 мм площадь поверхности ванны расплава, полученная с УЗК, больше, чем без УЗК. Дополнительное акустическое воздействие привело к увеличению площади поверхности сварной точки для всех экспериментов. Максимальное увеличение достигнуто для эксперимента № 3, где площадь поверхности сварной точки увеличилась на примерно на 24 %.

Как показано на рис. 4, б, влияние УЗК на площадь поверхности ванны расплава при обработке пластины толщиной 2 мм неоднозначно. Для первого и второго экспериментов воздействие УЗК привело к увеличению ванны расплава на 5 и 15 % соответственно, а для эксперимента № 3 – к ее уменьшению на 14 %. Возможно, такой результат связан с образованием и распределением по пластине узлов и пучностей ультразвуковой волны, которые в процессе обработки непостоянны. Более того, увеличение площади поверхности также может быть связано с интенсификацией течений в ванне расплава [5].

В работе проведены эксперименты по обработке нержавеющей стали лазерно-акустическим методом. Разработана соответствующая оснастка, позволяющая учесть конструктивные особенности ультразвукового излучателя, а также обеспечивающая необходимую жесткость и неподвижность закрепления образцов.

Проведен анализ качества полученных поверхностей сварных точек. Были выявлены дефекты вида «трещина» и «усадочная раковина». Отмечается, что для эксперимента № 2 без применения УЗК получена сварная точка с усадочной раковиной на поверхности, в то время как с дополнительным введением УЗК данный вид дефекта отсутствует.

Проведен анализ влияния УЗК на площадь поверхности ванны расплава. Для всех экспериментов при обработке нержавеющей стали толщиной 1,5 мм отмечается увеличение площади поверхности ванны расплава от 8 до 24 %. При обработке нержавеющей стали толщиной 2 мм отмечается как увеличение на 5 и 15 %, так и уменьшение на 14 % площади поверхности ванны расплава.

На основе литературного обзора можно сделать вывод о том, что разработка лазерно-акустического способа обработки сталей является одним из перспективных научных направлений по улучшению физико-механических свойств сварных швов и покрытий. В данной работе проведена апробация лазерно-акустического способа и исследовано влияние УЗК на площадь поверхности сварной точки. Выяснено, что при варьировании таких параметров эксперимента, как толщина пластины и режимов обработки, площадь поверхности сварной точки может как увеличиваться, так и уменьшаться. Для дальнейшей аргументации о целесообразности разработки лазерно-акустического метода требуются дополнительные

исследования микроструктуры, прочности, твердости, глубины проплавления и т. д., что и планируется сделать в дальнейших работах коллектива авторов.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда № 23-29-00219.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горунов А.И, Нюхляев О.А., Гильмутдинов А.Х. Лазерно-акустическая сварка образцов из стали 12Х18Н9Т // Вестник ЮГУ. 2023. № 4 (71). DOI: 10.18822/byusu202304112-119
2. Kumar S., Kumar D., Singh I., Rath D. (2022). An insight into ultrasonic vibration assisted conventional manufacturing processes: A comprehensive review. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, Vol. 14, Issue 6, p. 168781322211078, SAGE Publications. <https://doi.org/10.1177/16878132221107812>
3. Gilmudinov A.Kh., Gorunov A.I., Nyukhlaev O.A., Schmidt M. Investigations of the sound frequency effect on laser acoustic welding of stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, Vol. 106, Issues 7–8, pp. 3033–3043, Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04825-5>
4. Liu Z., Jin X., Zhang J., Hao Z., Li J. Microstructure evolution and mechanical properties of SUS301L stainless steel sheet welded joint in ultrasonic vibration assisted laser welding. *Optics & Laser Technology*, 2022, Vol. 153, p. 108193, Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108193>
5. Исследование формы ванны расплава при лазерном воздействии на сталь AISI 316L с учетом конвекции Марангони / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2023. № 2 (134). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2248>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНЫХ РАЗРУШЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Шеховцева Е.В. , к.т.н.


ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск, Российская Федерация

E-mail: evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

Представлены результаты влияния химико-термической обработки на структуру упрочненного слоя зубчатых колес и образцов из материалов 18X2H4MA, 20X3MBФ-Ш и 12X2H4A-Ш в рамках технологического процесса. Выполнен анализ трансформации деструкции материала в зоне контакта в процессе обкатки. Отмечены преобразования структуры и свойств конструкционных сталей.

Ключевые слова: металлографический анализ, химико-термическая обработка, зона выкрашивания, деструкция материала

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF THE FATIGUE FAILURE PROCESS OF GEARS

Shehovtseva E.V. , PhD in Engineering Sciences

Public Joint Stock Company "UEC-Saturn", Rybinsk, Russian Federation

E-mail: evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

The results of the influence of chemical and thermal treatment on the structure of the hardened layer of gears and samples from materials 18X2H4MA, 20X3MVF-Sh and 12X2H4A-Sh in the framework of the technological process are presented. The analysis of the transformation of the destruction of the material in the contact zone during the running-in process is performed. Transformations of the structure and properties of structural steels are noted.

Keywords: metallographic analysis, chemical and thermal treatment, staining zone, destruction of the material

Природа усталости металла – это комплексный процесс постепенного накопления повреждений при циклических нагрузках, обуславливающий изменения материала, в результате чего происходит его разрушение. Одной из причин такого разрушения может быть нарушение постоянства структуры твердого вещества. Это приводит к локальной концентрации внутренней напряженности по границам ионов металла, что под действием внешнего усилия вызывает повреждения структуры и свойств материала. В процессе эксплуатации зубчатых колес циклические переменные нагрузки инициируют разрушения усталостного характера с деградацией структуры и свойств материала [1–2].

Изменение в кристаллической решетке металла, происходящее при переменных нагрузках, протекают в зоне диффузионного слоя с развитием повреждений внутрь объема материала. Для предотвращения усталостного разрушения материала важно понять технологические факторы для возможности повышения усталостной прочности на этапах проектирования узла и изготовления деталей [3].

Целью работы является изучение связи структуры материала и его природы сопротивления в аспекте технологии упрочнения поверхностного слоя и поверхностной прочности сопрягаемых материалов при циклическом нагружении.

Металлографическая структура с усталостными деструкциями выкрашивания и микротрещинами продемонстрирована на рис. 1–5. На рис. 6 представлено влияние химико-термической обработки на структуру материала.

Рис. 1 иллюстрирует структуру образцов с нитроцементацией из материала 20X3MBФ-Ш после обкатки в $8,4 \cdot 10^7$ циклов (комплект 2 пара 7). Параметры упрочненного слоя: мик-

ротвердость рабочей поверхности – 763 HV при твердости сердцевины 362 HV и глубине слоя 0,65 мм. На рис. 1, б места выкрашивания обозначены стрелками, на рис. 1, а – место зарождения трещины усталостного характера. Наружный облик образца после испытаний на контактную выносливость представлен на рис. 7, а.

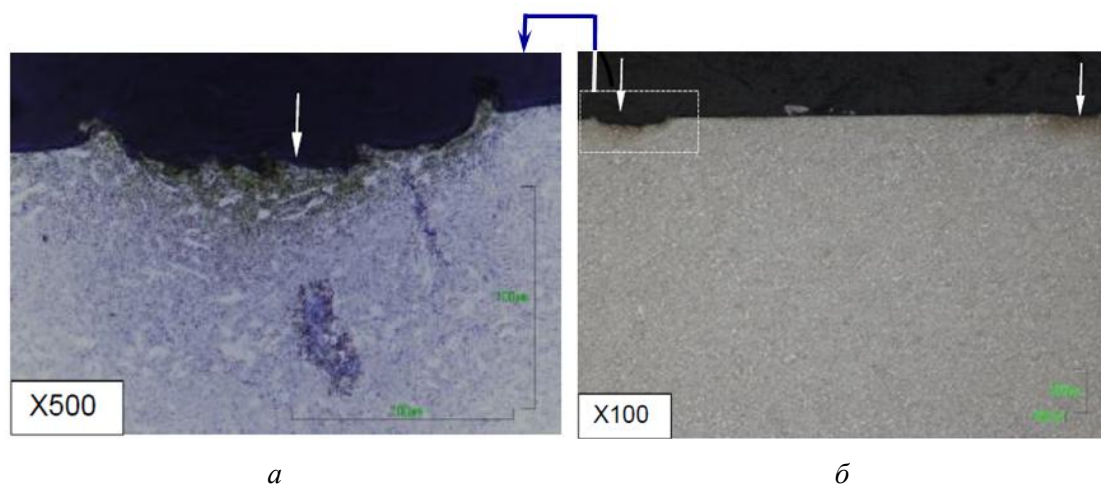


Рис. 1. Структура ролика (материал 20X3МВФ-III) после нитроцементации и испытаний: а – в зоне выкрашивания, $\times 500$; б – диффузионный слой, $\times 100$

На рис. 2 изображена структура образцов с нитроцементацией из материала 20X3МВФ-III после обкатки в $8,1 \cdot 10^7$ циклов (комплект 1 пара 7). Параметры упрочненного слоя: микротвердость рабочей поверхности – 768 HV при твердости сердцевины 379 HV и глубине слоя 0,7 мм.

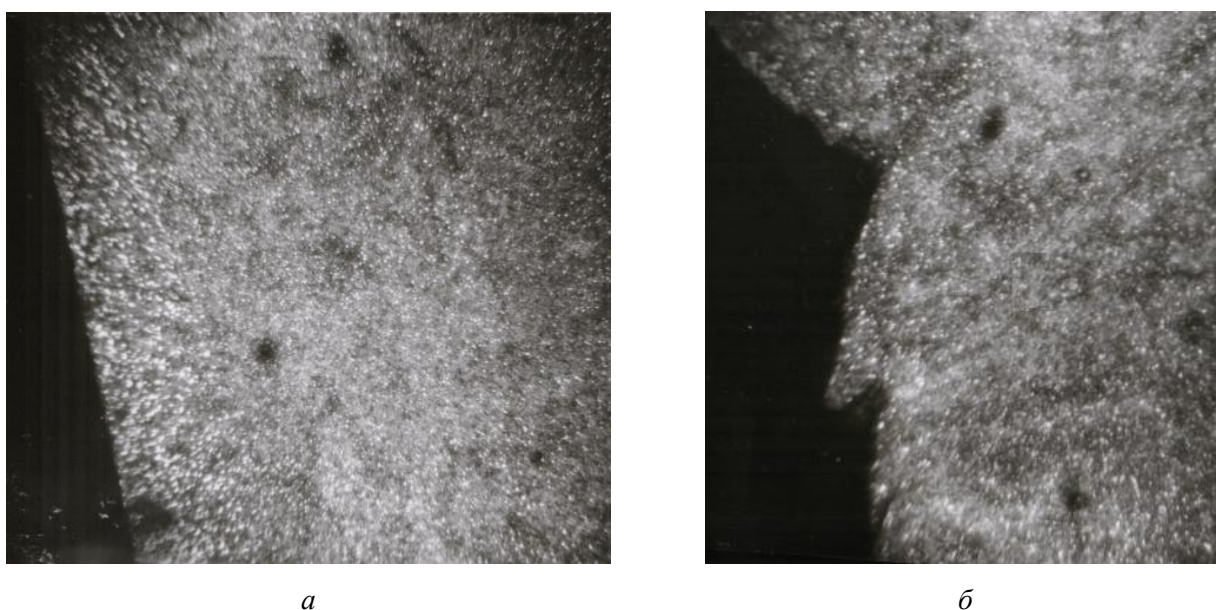


Рис. 2. Структура ролика (материала 20X3МВФ-III) после нитроцементации и испытаний, $\times 200$: а – поверхность без повреждения; б – в зоне выкрашивания

Рис. 3 визуализирует структуру образца с нитроцементацией из 20X3МВФ-III после обкатки в $1,4 \cdot 10^6$ циклов (комплект 1 пара 1). Параметры упрочненного слоя: микротвердость рабочей поверхности – 776 HV при твердости сердцевины 401 HV и глубине слоя 0,72 мм. Микротрещина распространяется перпендикулярно рабочей поверхности, имеет протяженность 0,421 мм. Наружный облик образца после испытаний на контактную выносливость представлен на рис. 7, б.

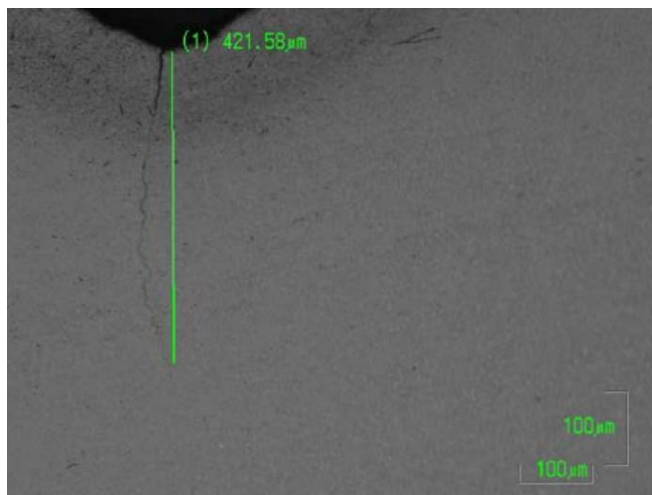
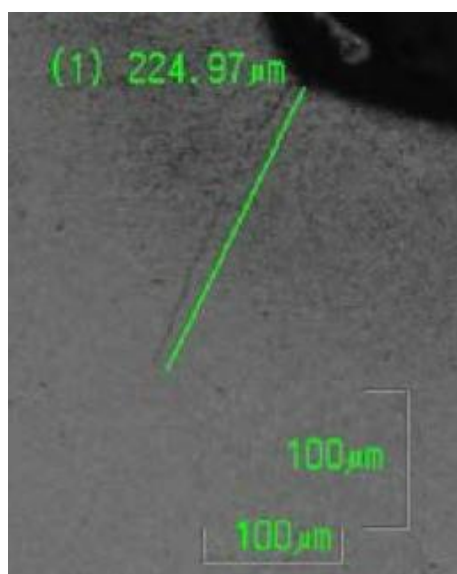
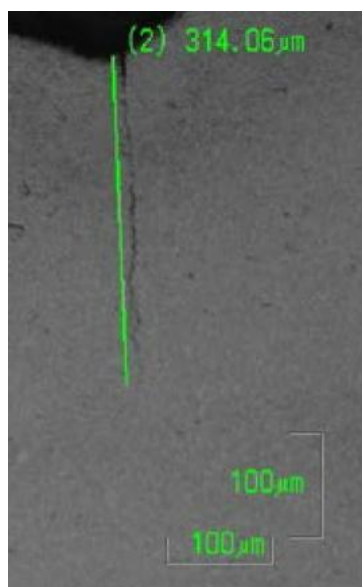


Рис. 3. Структура ролика из 20Х3МВФ-Ш после нитроцементации в зоне выкрашивания, $\times 100$

Рис. 4, а демонстрирует структуру образца с нитроцементацией из материала 20Х3МВФ-Ш после обкатки в $1,3 \cdot 10^7$ циклов (комплект 2 пара 5). Параметры упрочненного слоя: микротвердость рабочей поверхности – 773 HV при твердости сердцевины 391 HV и глубине слоя 0,8 мм. Микротрещина, направленная перпендикулярно рабочей поверхности, имеет протяженность 0,225 мм. Наружный облик образца после испытаний на контактную выносливость представлен на рис. 7, в.



а



б

Рис. 4. Структура ролика (материал 20Х3МВФ-Ш) после нитроцементации, $\times 100$:

а – комплекта 2 пара 5; б – комплекта 3 пара 4

Для образца (комплект 3 пара 4) на рис. 4, б аналогично при наработке в $1,4 \cdot 10^7$ циклов параметры упрочненного слоя: микротвердость рабочей поверхности – 766 HV при твердости сердцевины 371 HV и глубине слоя 0,85–0,9 мм. Протяженность микротрещины составляет 0,341 мм.

Рис. 5 иллюстрирует структуру образцов с нитроцементацией из материала 12Х2Н4А после обкатки в $5,4 \cdot 10^6$ циклов (комплект 1 пара 1). Параметры упрочненного слоя: микротвердость рабочей поверхности – 820 HV при твердости сердцевины 391 HV и глубине слоя 0,6–0,62 мм. Протяженность микротрещины составляет 0,56 мм. Наружный облик образца после испытаний на контактную выносливость представлен на рис. 7, г.

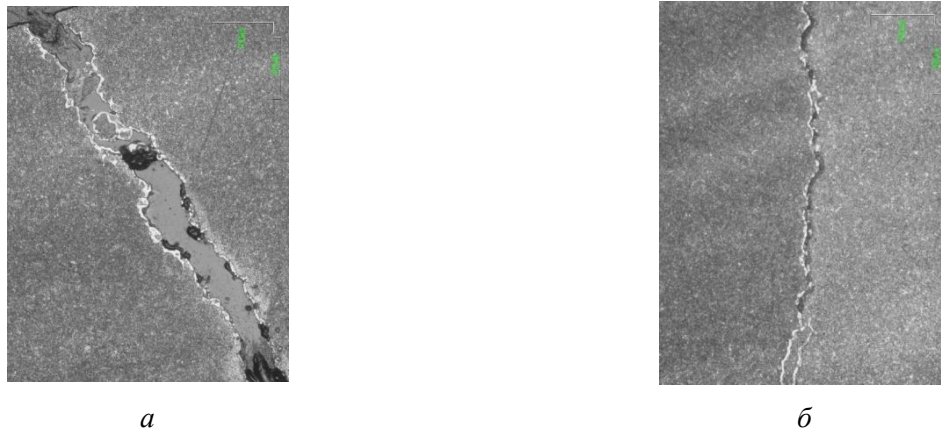


Рис. 5. Структура ролика (материала 12Х2Н4А-Ш) после нитроцементации, $\times 100$:
a – в зоне выкрашивания; *б* – вглубь металла

Рис. 6, *a* наглядно демонстрирует важность соблюдения параметров химико-термической обработки и ее негативные последствия в случае нарушения значений параметров. Фактическая глубина упрочненного слоя составляет 0,6–0,65 мм при требовании чертежа 0,2–0,4 мм (рис. 6, *б*). Выявлен (см. рис. 6, *б*) хрупкий слой глубиной до 0,035 мм. В измененном слое выявлены отслоения, надрывы, от единичных надрывов развиваются трещины в материал образцов по азотированному слою, протяженность трещин до 0,3 мм.

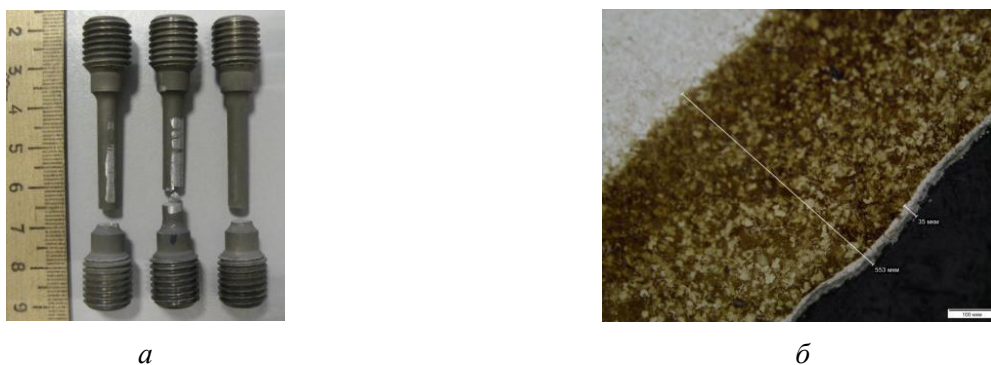


Рис. 6. Образцы из материала 18Х2Н4МА:
a – образцы после растяжения; *б* – структуры, $\times 100$



Рис. 7. Наружный облик контактной поверхности образца после испытаний:
a – $N = 8,4 \cdot 10^7$ циклов материал 20Х3МВФ-Ш; *б* – $N = 1,4 \cdot 10^6$ циклов материал 20Х3МВФ-Ш;
в – $N = 1,3 \cdot 10^7$ циклов материал 20Х3МВФ-Ш; *г* – $N = 5,4 \cdot 10^6$ циклов материал 12Х2Н4А-Ш

В заключение следует отметить, что карбидная сетка, находящаяся на границе зерен, является очагом для возникновения трещин, которые приводят к изменению наружной формы поверхности при ее последующей деградации. Первые признаки деструкции материала при малой глубине диффузионного слоя зарождаются под зоной упрочнения; с увеличением глубины диффузионного слоя средоточие деградации смещается в объем упрочненного слоя. Это наглядно демонстрирует, что эффект химико-термической обработки определяется соотношением глубины зоны насыщения к сердцевине. Также важным моментом являются последующие операции технологического процесса. Это закалка, отпуск и шлифовка после операции нитроцементации; после операции ионного азотирования – это закалка и охлаждение. Таким образом, свойства и стабильность азотированных слоев формируются только режимами химико-термической обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Упрочнение поверхностного слоя рабочих поверхностей зубчатых колес с помощью химико-термической обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 8 (152). С. 374–378.
2. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Особенности повреждения рабочих поверхностей зубчатых колес ГТД // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 6. С. 406–416.
3. Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 35–42.

ГРАДИЕНТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Ярьеско С.И.^{1,2}, д.т.н., зав. лабораторией СФ ФИАН, Балакиров С.Н.¹, инженер

¹ Самарский филиал ФИАН, г. Самара, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: s.balakirov@yandex.ru

Представлена методика определения оптимального режима импульсного лазерного упрочнения режущего инструмента, изготовленного из двухфазного вольфрамкобальтового твердого сплава. В основу методики положено правило, согласно которому при оптимальном режиме лазерной обработки (ЛО) термические напряжения в зоне лазерного воздействия (ЗЛВ) не должны превышать напряжения разрушения на границе зерен WC-WC. Приведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

Ключевые слова: твердый сплав WC-Co, лазерная обработка, температурное поле, градиент температуры, граница зерен WC-WC, термические напряжения

TEMPERATURE GRADIENT AT PULSED LASER HEAT TREATMENT OF HETEROPHASE HARD ALLOYS

Yaresko S.I.^{1,2}, Grand PhD in Engineering Sciences, Head of the Laboratory for Laser-Induced Processes, Balakirov S.N.¹, engineer

¹ Samara branch of P.N. Lebedev Physical Institute, Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: s.balakirov@yandex.ru

A procedure for determining the optimal regime of pulsed laser hardening of a cutting tool made of a two-phase tungsten-cobalt hard alloy is presented. The method is based on the rule according to which, under the optimal laser treatment mode, thermal stresses in the laser impact zone should not exceed the fracture stresses at the grain boundary WC-WC. The calculation results are compared with experimental data.

Keywords: WC-Co hard alloy, laser treatment, temperature field, temperature gradient, WC-WC grain boundary, thermal stresses

В настоящее время одним из основных инструментальных материалов на машиностроительных предприятиях являются твердые сплавы системы WC-Co. Для повышения стойкости твердосплавного режущего инструмента (РИ), необходимого современному производству, предлагаются разные подходы [1–3]. Одним из них является импульсная упрочняющая лазерная обработка (ЛО) передней поверхности режущего клина инструмента. Данный метод позволяет повысить стойкость твердосплавного инструмента до двух раз [2]. Тем не менее на практике в машиностроении ЛО РИ применяется значительно реже других методов, например, нанесения износостойких покрытий. К числу основных проблем, возникающих при применении ЛО твердосплавного вольфрамкобальтового инструмента, относится сложность определения оптимальных режимов импульсной упрочняющей ЛО.

Трудность назначения режимов ЛО заключается в том, что при недостаточной плотности энергии лазерного излучения (ЛИ) не происходит упрочнения твердосплавного инструмента, стойкость РИ снижается и при слишком высокой плотности энергии. Лошак М.Г. предположил, что при высокоскоростном нагреве в процессе ЛО на обрабатываемой поверхности возникают термические напряжения, которые могут превышать предел прочности материала [3]. В результате этого образуются микротрещины, приводящие к разрушению РИ в процессе эксплуатации. Справедливость данного предположения доказана экспериментально [2].

При повышении плотности энергии ЛИ в результате обработки на упрочняемой поверхности обнаруживаются микротрещины, контролируемые визуально (увеличение 50–60 крат) или с помощью метода акустической эмиссии [4].

В качестве оптимальных режимов импульсной ЛО рекомендуется выбирать такие плотность энергии ЛИ и кратность обработки, при которых достигаются максимальная температура нагрева и глубина зоны упрочнения, но при этом гарантированно не происходит образования микротрещин [2]. Экспериментально подтверждено, что оптимальная плотность энергии составляет 75 % от значения, при котором начинается процесс трещинообразования.

Как правило, режимы импульсной ЛО, когда на поверхности ЗЛВ появляются первые микротрещины, определяют экспериментально, последовательно увеличивая плотность энергии ЛИ и визуально фиксируя состояние поверхности ЗЛВ [2]. Данная методика позволяет достаточно корректно и обоснованно назначать режимы упрочняющей ЛО, однако обладает высокой трудоемкостью.

В настоящей работе для определения оптимальных режимов упрочняющей импульсной ЛО твердосплавного вольфрамокобальтового инструмента предложено использовать аналитический метод расчета, при котором термические напряжения, возникающие в ЗЛВ, сравнивают с напряжениями разрушения сплава.

Двухфазные твердые сплавы на основе карбида вольфрама с содержанием кобальтового связующего в 6–8 % являются одним из наиболее распространенных инструментальных материалов. Поэтому для отработки предлагаемой методики расчета оптимальных режимов лазерного упрочнения был выбран сплав ВК6.

Для моделирования и расчета термических напряжений в процессе лазерного термоупрочнения рассмотрим вольфрамокобальтовый твердый сплав в виде системы, состоящей из одного зерна карбида вольфрама, взаимодействующего с соседними зёрнами и кобальтовой прослойкой. При этом предполагается, что зерно монокарбида вольфрама пластически не деформируется, хотя, по данным [5], возможно скольжение по базисным плоскостям при внешнем нагружении.

Согласно данным [6] разрушение твердого сплава происходит в первую очередь на границе WC-WC. Термические напряжения, возникающие в твердом сплаве в пределах одного зерна в соответствии с законом Гука, можно определить следующим образом:

$$\sigma = \Delta T \cdot \alpha \cdot E, \quad (1)$$

где ΔT – разница температур при ЛО в пределах размера одного зерна в направлении вглубь материала, α – коэффициент линейного температурного расширения, $\alpha = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$ [2], E – модуль упругости Юнга, $E = 628 \text{ ГПа}$ [2].

При импульсной ЛО температура в ЗЛВ определяется в соответствии с [2, 7] по формулам (2):

$$\begin{aligned} T_1(z, t) &= 32 \frac{A\varepsilon\sqrt{at}^{3/2}}{\lambda\tau_u^2} i^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) + T_0, & \tau_u/2 > t > 0 \\ T_2(z, t) &= T_1(z, t) - 64 \frac{A\varepsilon\sqrt{a}(t - \tau_u/2)^{3/2}}{\lambda\tau_u^2} i^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a}(t - \tau_u/2)}\right), & \tau_u > t > \tau_u/2 \\ T_3(z, t) &= T_2(z, t) + 32 \frac{A\varepsilon\sqrt{a}(t - \tau_u)^{3/2}}{\lambda\tau_u^2} i^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a}(t - \tau_u)}\right). & t > \tau_u \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь

$$i^3 \operatorname{erfc}(x) = 1/6 \left[\frac{1+x^2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} - x \left(\frac{3}{2} + x^2 \right) \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \right) \right],$$

где A – коэффициент поглощения ЛИ (в расчетах принято, что для сплава с $Ra = 0,4$ мкм ($A = 0,7$), λ – коэффициент теплопроводности, a – коэффициент температуропроводности, T_0 – начальная температура, ε – плотность энергии ЛИ, τ_u – длительность импульса ЛИ, t – текущее время, z – текущее расстояние от поверхности ЗЛВ [2, 7].

Для определения величины ΔT – разницы температур из выражения (1) – необходимо рассчитать градиент температуры как производную температуры из формулы (2) по координате в определенный момент времени. В первом приближении считаем, что максимальное значение градиента температуры достигается в момент времени $t = 0,5\tau_u$. При вычислении значений градиента температуры был использован программный продукт Mathcad.

Продифференцировав выражение (2) и подставив в (1) и (2) значения соответствующих теплофизических характеристик, известных для сплава ВК6, получим значения термических напряжений в зависимости от режимов ЛО. При этом учитывалось, что размер зерен карбидной фазы в твердых сплавах меняется от 0,5 до 6 мкм [6]. В расчетах принято среднее значение размера зерна WC, равное 4 мкм. Результаты расчета приведены в таблице и на рисунке.

Все вычисления были выполнены для однократного лазерного воздействия и значений плотности энергии, изменяющейся в диапазоне от 0,9 до 1,9 Дж/мм² с шагом 0,2 Дж/мм². Полученные значения термических напряжений (см. таблицу) сравнивались с приведенным в [6] значением напряжения начала трещинообразования.

Наиболее слабым структурным элементом, по терминологии [6], в спеченных твердых сплавах вольфрамокобальтовой группы является граница «зерно – зерно». По данным Кабалдина Ю.Г. с сотрудниками, для сплава типа ВК8 образование термических трещин на границе «зерно – зерно» происходит при значении напряжения 80 МПа и выше. В связи с тем, что сплавы ВК6 и ВК8 близки по своим свойствам, при определении оптимального режима ЛО сплава ВК6 было использовано значение разрушающего напряжения, при котором возникают термические трещины, известное для сплава ВК8.

Термические напряжения в пределах одного зерна карбида вольфрама в зависимости от плотности энергии ЛИ

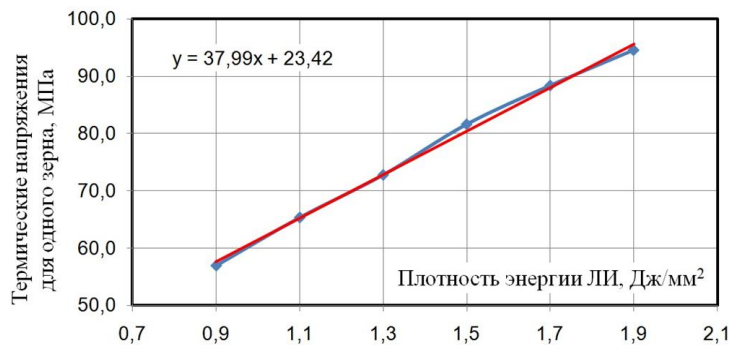
Плотность энергии ЛИ ε , Дж/мм ²	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9
Изменение температуры по глубине ЗЛВ на длине равной размеру зерна карбидной фазы ΔT , °C	18,51	21,24	23,65	26,52	28,72	30,72
Термические напряжения σ , МПа	57,0	65,4	72,8	81,6	88,4	94,4

Зависимость значений термических напряжений (σ) от плотности энергии (ε) ЛИ носит линейный характер и описывается уравнением вида (см. рисунок):

$$\sigma = 37,99\varepsilon + 23,42.$$

Тогда термические напряжения достигнут величины 80 МПа при плотности энергии $\varepsilon \sim 1,49$ Дж/мм².

По данным [2, 4] начало образования трещин при ЛО твердого сплава ВК6 методом акустической эмиссии фиксируется при плотности энергии 1,6 Дж/мм² и выше, а наибольший коэффициент увеличения стойкости упрочненного инструмента наблюдается при обработке с плотностью энергии от 1,1 до 1,3 Дж/мм². Полученное согласно проведенным расчетам значение плотности энергии, соответствующей началу трещинообразования, хорошо соответствует приведенным данным. На основании этого можно сделать вывод, что разработанная параметрическая модель позволяет определить оптимальные режимы упрочняющей ЛО с достаточно высокой точностью и может быть рекомендована для практического применения.



Зависимость термических напряжений от плотности энергии ЛИ

Результаты аналитических расчетов режимов ЛО достаточно хорошо коррелируют с экспериментальными данными, представленными в [2].

Таким образом, в работе предложен метод определения оптимального режима упрочняющей ЛО твердых сплавов, основанный на сравнении разрушающих напряжений на границе WC-WC с рассчитанными термическими напряжениями. Метод позволяет достаточно точно прогнозировать начало процесса трещинообразования в ЗЛВ при импульсной лазерной обработке твердых сплавов группы ВК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Осколкова Т.Н., Глезер А.М. Современное состояние научной проблемы поверхностного упрочнения карбидовольфрамовых твердых сплавов (обзор) // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 12. С. 980–991. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-12-980-991>
2. Ярьско С.И., Осколкова Т.Н., Балакиров С.Н. Модификация структуры и свойств вольфрам-кобальтовых твердых сплавов: монография. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 400 с. ISBN 978-5-9729-1406-7.
3. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наукова думка, 1984. 328 с.
4. Выбор режимов лазерной обработки вольфрам-кобальтовых твердых сплавов / С.И. Ярьско, А.А. Александрович, Н.П. Илюхина, Т.К. Кобелева // Сверхтвердые материалы. 1992. № 5. С. 22–27.
5. Исхакова Г.А., Синдеев В.И. Исследование высокоскоростной деформации карбида вольфрама // Сверхтвердые материалы. 1983. № 5. С. 49–54.
6. Наноструктурирование контактных поверхностей твердосплавного инструмента при резании / Ю.Г. Кабалдин, О.В. Кретинин, С.В. Серый, Д.А. Шатагин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 4 (97). С. 123–132.
7. The characteristic properties of structural phase transitions in T1 steel under laser irradiation / S.V. Kayukov, A.N. Pavlov, A.L. Petrov, Y.I. Yurin // Journal of Russian Laser Research. 1996. 17 (3). Pp. 235–246. <https://doi.org/10.1007/BF02066541>

Секция 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ОБОРУДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 621.822.6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЛАВНОГО ПРИВОДА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ОПОРАМИ КАЧЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ

Брунгардт А.В., аспирант, **Брунгардт М.В.**, к.т.н., доцент, **Шатохин С.Н.**, д.т.н., профессор

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация
E-mail: artibrung@gmail.com*

Представлены уточненная методика и результаты проектного расчета жесткости и виброустойчивости прямого и ременного главного привода станков с ЧПУ, частотно-управляемым асинхронным или синхронным электродвигателем и опорами качения шпинделя. Приведены аналитические уравнения и диаграмма виброустойчивости для определения безрезонансных параметрических диапазонов привода при фрезеровании, растачивании и точении.

Ключевые слова: станки с ЧПУ, частотно-управляемый привод, жесткость, виброустойчивость

DESIGN CALCULATION OF THE MAIN DRIVE OF MULTI-TASKING MACHINES WITH FREQUENCY CONTROL AND SPINDLE ROLLING SUPPORTS

Brungardt A.V., PhD student, **Brungardt M.V.**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Shatokhin S.N.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation
E-mail: artibrung@gmail.com*

An updated methodology and results of the design calculation of stiffness and vibration resistance of the direct and belt main drive of multi-tasking CNC machines, having a frequency-controlled asynchronous or synchronous electric motor and spindle rolling supports, are presented. Analytical conditions and a diagram for determining the sub-resonance and over-resonance ranges of milling, boring and turning were obtained.

Keywords: CNC machines, frequency-controlled drive, rigidity, vibration resistance

Актуальность темы. Влияние жесткости и виброустойчивости главного привода на параметрическую надежность станка, стойкость режущих инструментов и качество обработки особенно актуально для привода с частотно-управляемым электродвигателем и шпиндельными подшипниками качения при скорости вращения шпинделя 10000 об/мин и более [1, 2, 3].

При расчете жесткости (податливости) шпиндель прямого главного привода представляют двухконсольной полый цилиндрической балкой ступенчатой формы, установленной на двух упругих опорах, которая нагружена на передней консоли радиальной силой резания P (рис. 1).

Шпиндель ременного главного привода дополнительно нагружен на задней консоли радиальной силой натяжения ремня $Q \approx k_Q P_{max}$, где: P_{max} – максимальное значение силы резания; $k_Q = 1,5$ для поликлинового и $k_Q = 1,25$ для зубчатого ремня.

Ниже приведены уточненные аналитические функции радиальной податливости на переднем конце шпинделя, полученные на основе метода Верещагина и принципа суперпозиции, которые учитывают влияние изгиба и жесткости опор шпинделя при различном направлении сил P и Q :

– функция радиальной податливости для действия только силы P

$$c_P = \frac{a^2}{3E} \left(\frac{a}{J_a} + \frac{l}{J_l} \right) + \frac{(a+l)^2}{j_{II} l^2} + \frac{a^2}{j_3 l^2} - \left(\frac{a}{3E J_l} + \frac{a+l}{j_{II} l^2} + \frac{a}{j_3 l^2} \right)^2,$$

– функция радиальной податливости для действия только силы Q

$$c_Q \approx k_Q \left(\frac{alc}{6EJ_l} - \frac{(a+l)c}{j_{\text{п}}l^2} - \frac{a(l+c)}{j_3l^2} \right),$$

– функции радиальной податливости для одновременного действия сил P и Q при их одинаковом, противоположном и ортогональном направлении соответственно

$$c_{PQ} = c_P + c_Q, \quad c_{PQ} = c_P - c_Q, \quad c_{PQ} = \sqrt{c_P^2 + c_Q^2}.$$

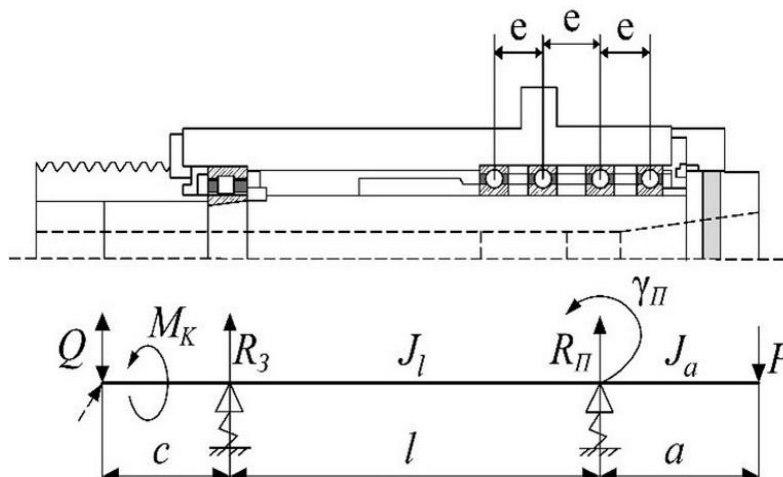


Рис. 1. Расчетная схема шпинделя

В функциях c_P и c_Q обозначены: a и c – длина консольных участков шпинделя (м), которая принимается возможно малой; l – длина межопорного участка шпинделя (м), определяемая в результате расчета; J_a и J_l – осевые моменты инерции поперечного сечения шпинделя (м⁴) на участках длиной a и l ; $j_{\text{п}}$ и j_3 – радиальная жесткость передней и задней опоры качения шпинделя, определяемая как $j = j_p k_p$, где j_p – радиальная жесткость каждого подшипника качения (Н/м), определяемая по левому графику рис. 2, k_p – число подшипников качения с радиальной жесткостью; $\gamma_{\text{п}} = j_p e^2 (k_p - 1) + j_o d_n^2 k_o / 8$ – угловая жесткость передней опоры шпинделя (Нм/рад), где e – среднее осевое расстояние между центрами подшипников качения (м), k_o – число подшипников качения с осевой жесткостью, j_o – осевая жесткость подшипника качения (Н/м), определяемая по правому графику рис. 2.

В таблице показаны основные компоновки подшипников качения в опорах шпинделей главного привода, применяемые в многоцелевых станках, которые учитывают, что передняя опора больше задней влияет на жесткость, виброустойчивость и точность вращения шпинделя; жесткость роликовых подшипников в 5–8 раз больше шариковых; быстроходность шариковых подшипников в 2,5–3 раза больше роликовых; осевую нагрузку шпинделя должна воспринимать передняя опора, а задняя опора должна быть плавающей для уменьшения влияния теплового удлинения шпинделя на изменение натяга и точность обработки.

Диаметр шпинделя в передней опоре $d_{\text{п}} \approx (1,4-1,6) d_{\text{в}}$, где $d_{\text{в}}$ – наибольший диаметр центрального отверстия полого шпинделя. Диаметр d_3 задней опоры должен быть меньше $d_{\text{п}}$ на 5–10 мм для осевой сборки шпинделя, кроме того, значения $d_{\text{п}}$ и d_3 должны соответствовать посадочному диаметру шпиндельных подшипников качения [3, с. 145–158].

Максимальная скорость вращения шпинделя $n_{\text{max}} \approx 1,3 V_{\text{max}} / D_{\text{max}}$ об/мин, где V_{max} – максимальная скорость резания (м/мин); D_{max} (м) – максимальный диаметр инструмента (для фрезерных, расточных и круглошлифовальных станков) или обрабатываемой поверхности (для токарных станков). Для конструкционной стали при чистовом точении $V_{\text{max}} = 500-1000$ м/мин, при скоростном фрезеровании $V_{\text{max}} = 1500-2000$ м/мин.

Основные компоновки подшипников качения шпинделей главного привода

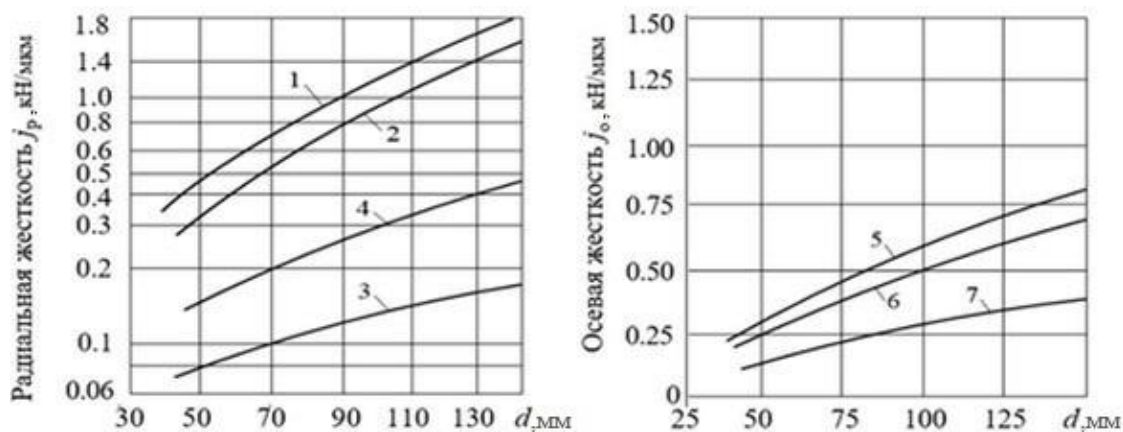
№	Компоновка подшипников качения		Тип подшипников качения		Диаметр и показатель быстроходности
	Задняя опора	Передняя опора	Задняя опора	Передняя опора	
1			4162900	697000	$d_{\text{ш}} = 60-200$ мм $d_{\text{ш}} n_{\text{max}} = 3 \cdot 10^5$ мм/мин
2			3182100	3182100 178800	$d_{\text{ш}} = 40-160$ мм $d_{\text{ш}} n_{\text{max}} = 4 \cdot 10^5$ мм/мин
3			3182100	46200 46100	$d_{\text{ш}} = 30-120$ мм $d_{\text{ш}} n_{\text{max}} = 6 \cdot 10^5$ мм/мин
4			46100	46200 46100	$d_{\text{ш}} = 30-100$ мм $d_{\text{ш}} n_{\text{max}} = 7 \cdot 10^5$ мм/мин
5			36100	36200 36100	$d_{\text{ш}} = 25-80$ мм $d_{\text{ш}} n_{\text{max}} = 9 \cdot 10^5$ мм/мин

При аналогичной обработке цветных сплавов и композитных материалов указанные значения V_{max} увеличивают в 1,5–2 раза.

На рис. 3 показана зависимость функций податливости c_P , c_Q и c_{PQ} от изменения параметра $l/d_{\text{ш}}$ при: $d_{\text{ш}} = a = c = 0,065$ м; $j_{\text{ш}} = 1,9 \cdot 10^8$ Н/м; $j_3 = 1,8 \cdot 10^8$ Н/м; $\gamma_{\text{ш}} = 1,33 \cdot 10^5$ Нм; $k_Q = 1,25$. Графики 4 и 5 соответствуют функциям c_P и c_Q , а графики 1, 2, 3 – функциям c_{PQ} при одинаковом, противоположном и ортогональном направлении сил P и Q соответственно.

Видно, что при $l/d_{\text{ш}} \approx 2,5$ и одинаковом направлении сил значение функции $c_{PQ} \approx 0,5 \cdot 10^{-9}$ вдвое меньше соответствующего значения функции $c_P \approx 9 \cdot 10^{-9}$ из-за взаимной компенсации упругих деформаций, создаваемых силами P и Q .

Для проверки проектного расчета необходимо сравнить полученное значение жесткости шпинделя с прямым приводом $j_{\text{ш}} = 1/c_P$, где c_P – минимальное значение этой функции по графику 4 рис. 3, с достигаемой в станкостроении жесткостью аналогичных шпинделей (рис. 4). Бóльшее или существенно меньшее значение рассчитанной жесткости указывает на ошибку или неоптимальный выбор параметров шпинделя.



Диаметр шпинделя в передней и задней опоре (мм)

Рис. 2. Жесткость шпиндельных подшипников качения с натягом:

- 1 – радиальных с двумя рядами цилиндрических роликов и конусным отверстием внутреннего кольца,
- 2 и 5 – радиально-упорных с двумя рядами конических роликов,
- 3 и 7 – радиально-упорных шариковых,
- 4 – радиально-упорных с керамическими шариками,
- 6 – упорно-радиальных с двумя рядами шариков

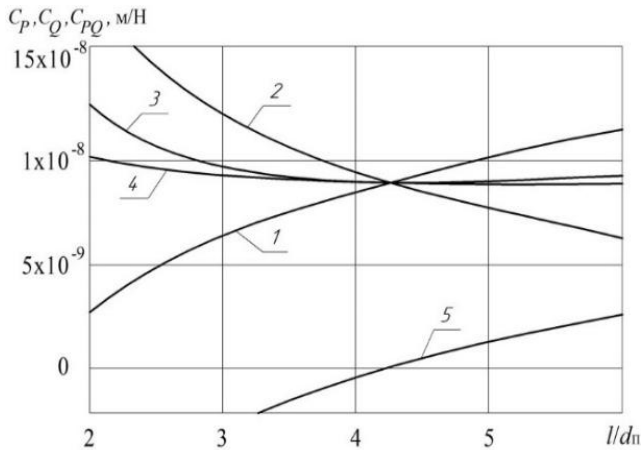


Рис. 3. Зависимость функций c_p , c_Q и c_{pQ} от безразмерного параметра l/d_n

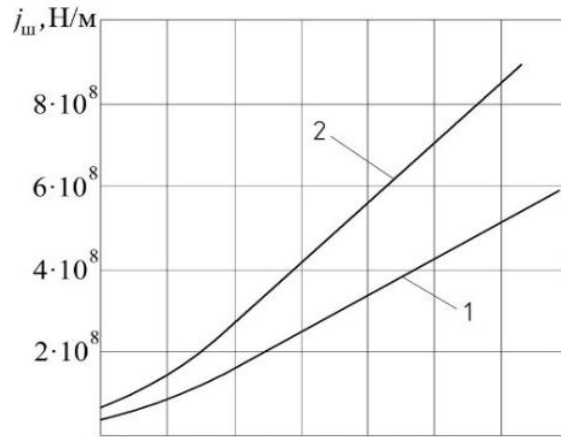


Рис. 4. Достигаемая жесткость шпинделей с опорами качения [3]:

1 – шариковыми, 2 – роликовыми

Влияние технологической оснастки шпинделя (патрон с заготовкой для токарных станков или инструментальная оправка для фрезерно-расточных и круглошлифовальных станков) увеличивает суммарную податливость шпинделя $c_{ш}$ в зоне резания на 70 % и более. Из условия, что 50 % допустимой погрешности размерной обработки Δ создает радиальная податливость шпинделя с технологической оснасткой, определим допустимое значение силы резания $P_{max} < 0,35 \Delta / c_{ш}$.

При расчете виброустойчивости главного привода определяют дорезонансные диапазоны крутильных и радиальных колебаний шпинделя, соответствующие условиям $\omega_b < 0,7 \omega_k$ и $\omega_b < 0,7 \omega_p$, а также зарезонансный диапазон крутильных колебаний, соответствующий условию $\omega_b > 1,3 \omega_k$, где ω_b – наибольшая частота вынужденных колебаний шпинделя, ω_k – минимальная частота собственных крутильных колебаний шпинделя, ω_p – минимальная частота собственных радиальных колебаний шпинделя.

Наибольшее значение частоты вынужденных крутильных и радиальных колебаний шпинделя $\omega_b = z_{ш} n_{ш} / 60 \text{ с}^{-1}$, где $n_{ш}$ – скорость вращения шпинделя (об/мин), $z_{ш}$ – число вынужденных колебаний за один оборот шпинделя. При фрезеровании $z_{ш}$ равно числу зубьев фрезы при точении заготовки с дисбалансом $z_{ш} = 1$, при точении заготовки с периодическими некруглостями $z_{ш}$ равно числу некруглостей, при чистовом точении и растачивании $z_{ш} \approx 0,5 k_n$, где k_n – число тел качения радиального подшипника передней опоры.

Минимальная частота собственных крутильных колебаний шпинделя с прямым приводом от частотно-управляемого асинхронного электродвигателя (без учета демпфирования, которое слабо влияет на частоту) $\omega_k = \sqrt{\varphi_3 / J_{ш}} / (2\pi)$, где $\varphi_3 = 3000 N_n / f_n f_{ш}$ – крутильная жесткость электродвигателя (Нмс) [1]; N_n – номинальная мощность электродвигателя (Нм/с); $f_n = 50 \text{ с}^{-1}$ – номинальная частота переменного тока; $f_{ш} = n_{ш} / 60 \text{ с}^{-1}$ – частота тока при требуемой скорости вращения шпинделя $n_{ш} > n_n$ об/мин; $J_{ш} = \sum_1^i [m_i (d_{ni}^2 + d_{bi}^2) / 8]$ – центробежный момент инерции массы шпинделя (Нмс²), где m_i – масса вращающихся частей шпинделя (Нс²/м); d_{ni} и d_{bi} – усредненные значения наружного и внутреннего диаметра вращающихся частей шпинделя (м); i – число вращающихся частей шпинделя. С учетом значения φ_3 получим $\omega_k \approx 9 \sqrt{N_n / (J_{ш} f_n f_{ш})}$.

Минимальная частота собственных радиальных колебаний шпинделя (без учета демпфирования) $\omega_p = \frac{\sqrt{j_{ш}}}{2\pi m_{пр}} \text{ с}^{-1}$, где $j_{ш}$ – радиальная жесткость шпинделя (Н/м), $m_{пр} = m_a m_l m_c / (m_a m_l + m_l m_c + m_a m_c)$ – приведенная масса шпинделя (Нс²/м), m_l , m_a , m_c – массы межопорной и консольных частей шпинделя с учетом вращающейся оснастки.

На рис. 5 приведена диаграмма виброустойчивости прямого главного привода с частотно-управляемым асинхронным электродвигателем и опорами качения шпинделя при: $N_n = 12 \cdot 10^3 \text{ Нм/с}$; $n_{max} = 12000 \text{ об/мин}$; $d_n = 0,065 \text{ м}$; $l/d_n = 2,5$; $J_{ш} = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ Нмс}^2$; $j_{ш} = 1,24 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$;

$\gamma_{\Pi} = 1,23 \cdot 10^5$ Нм/рад; $m_{\text{пр}} = 7,4$ Нс²/м, которая соответствует условиям, определяющим параметрические диапазоны дорезонансных, резонансных и зарезонансных колебаний шпинделя:

– условие $z_{\text{ш}} < 6\sqrt{N_{\text{н}}/(J_{\text{ш}}f_{\text{н}}f_{\text{ш}}^3)}$ определяет дорезонансный параметрический диапазон крутильных колебаний шпинделя (ниже графика 1), который рекомендуется использовать для силового точения и фрезерования труднообрабатываемых материалов;

– условия $z_{\text{ш}} > 6\sqrt{N_{\text{н}}/(J_{\text{ш}}f_{\text{н}}f_{\text{ш}}^3)}$ и $z_{\text{ш}} < 11\sqrt{N_{\text{н}}/(J_{\text{ш}}f_{\text{н}}f_{\text{ш}}^3)}$ определяют параметрический диапазон резонансных крутильных колебаний шпинделя (между графиками 1 и 2), который не рекомендуется использовать для размерной обработки;

– условия $z_{\text{ш}} > 11\sqrt{N_{\text{н}}/(J_{\text{ш}}f_{\text{н}}f_{\text{ш}}^3)}$ и $z_{\text{ш}} < 0,1\sqrt{j_{\text{ш}}/m_{\text{пр}}}/f_{\text{ш}}$ определяют параметрический диапазон зарезонансных крутильных и дорезонансных радиальных колебаний шпинделя (между графиками 2 и 3), который рекомендуется использовать для скоростного точения и фрезерования;

– условие $z_{\text{ш}} > 0,1\sqrt{j_{\text{ш}}/m_{\text{пр}}}/f_{\text{ш}}$ определяет параметрический диапазон резонансных и зарезонансных радиальных колебаний шпинделя (выше графика 3), который не рекомендуется для размерной обработки.

Для ременного главного привода с асинхронным электродвигателем параметрические диапазоны колебаний шпинделя соответствуют диаграмме рис. 5, если крутильная жесткость ременной передачи $\varphi_{\text{р}} \gg \varphi_{\text{з}}$. При $\varphi_{\text{р}} \approx \varphi_{\text{з}}$, допустимые значения $z_{\text{ш}}$ уменьшаются в 1,4 раза.

Для мотор-шпинделя с синхронным вентильным электродвигателем, который не имеет резонансных крутильных колебаний, дорезонансный параметрический диапазон радиальных колебаний шпинделя расположен ниже графика 3 на диаграмме рис. 5.

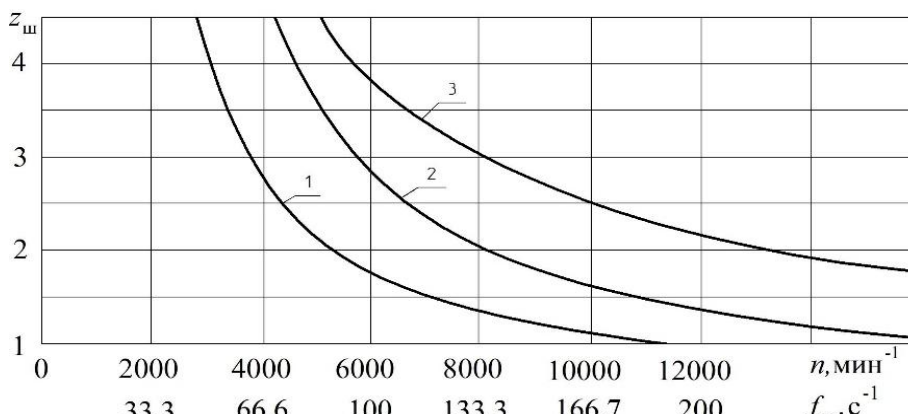


Рис. 5. Диаграмма виброустойчивости главного привода

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В наиболее известной методике проектного расчета радиальной жесткости шпинделей с опорами качения [4, с. 225–228] и [5, с. 177–180] влияние защемляющего углового момента передней опоры при изгибе и перекосе консольно нагруженного шпинделя учитывается эмпирическим коэффициентом, значение которого приближенно зависит от компоновки опор качения шпинделя; в приведенной методике аналитически определено точное значение угловой жесткости γ_{Π} передней опоры, влияние которой учитывает четвертое слагаемое функции $c_{\text{р}}$.

2. В системе ЧПУ многоцелевых станков необходимо использовать приведенные выше параметрические условия, позволяющие обеспечить работу главного привода без резонанса крутильных и радиальных колебаний шпинделя.

3. Руководство по эксплуатации многоцелевых станков должно содержать диаграмму дорезонансных, резонансных и зарезонансных параметрических диапазонов крутильных и радиальных колебаний шпинделя, аналогичную рис. 5.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бушуев В.В., Сабиров Ф.С. Направления развития мирового станкостроения // Вестник МГТУ Станкин. 2010. № 1. С. 24–30.
2. Шатохин С.Н., Брунгардт М.В., Брунгардт А.В. Технологическое оборудование машиностроительных производств: учеб. пособие для вузов. Красноярск: СФУ, 2023. 221 с.
3. Шатохин С.Н., Брунгардт М.В., Брунгардт А.В. Безрезонансное фрезерование на станках с ЧПУ. М.: Технология машиностроения. 2023. № 11. С. 5–10.
4. Металлорежущие станки: учебник для машиностроительных вузов / Колл. авторов под ред. В.Э. Пуша. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
5. Кочергин А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование: учеб. пособие для вузов. Минск: Высшая школа, 1991. 382 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕРА ВЫБОРКИ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА

Гуарна М.Д.¹, профессор, Денисенко А.Ф.², д.т.н., профессор, Ладягин Р.В.², аспирант, Якимов М.В.², к.т.н., доцент

¹ Университет Рима Сапиенса, г. Рим, Италия

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

Представлены различные объемы выборок экспериментальных данных, используемых в процессе обучения нейронной сети для прогнозирования эксплуатационных свойств шпиндельного узла. Установлено снижение точности и производительности нейронных сетей при размере выборки менее 50 %. Для каждого среза объема выбрана наилучшая сеть и проведен ее анализ.

Ключевые слова: нейрон, объем выборки, обучение нейросети, ошибка нейросети

DETERMINING THE RATIONAL SAMPLE SIZE OF A NEURAL NETWORK FOR PREDICTING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A SPINDLE ASSEMBLY

Guarna M.D.¹, Professor, Denisenko A.F.², Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Ladyagin R.V.², PhD student, Yakimov M.V.², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ Sapienza University of Rome, Rome, Italy

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

The article presents various volumes of samples of experimental data used in the process of training a neural network for predicting the operational properties of a spindle node. A decrease in the accuracy and performance of neural networks with a sample size of less than 50 % was found. The best network was selected for each volume slice and its analysis was carried out.

Keywords: neuron, sample size, neural network training, neural network error

Установлено, что применение нейронных сетей позволяет оценивать и прогнозировать эксплуатационные характеристики металлорежущих станков [1–3]. Для качественного построения таких сетей требуется в 10 раз больше обучающих данных (наблюдений), чем связей в модели [4].

В работе [5] была использована нейронная сеть со структурой многослойного персептрона MLP 3-7-3 [6] для исследования шпиндельного узла, включающая шесть переменных, что соответствует девяти связям модели. Таким образом, должно быть использовано не менее 90 наблюдений. Авторы использовали 108 наблюдений.

Построение осуществлялось в программе математического анализа Statistica. Сеть выбиралась из сводного списка нейросетей по критериям производительности и ошибки обучения. Характеристики сети приведены в табл. 1.

Поскольку проведение экспериментов для узлов металлорежущих станков с целью получения данных, необходимых для обучения нейросети, является трудоемкой задачей, в настоящей работе авторы предлагают оценить влияние объема обучающей выборки для получения сети равнозначного качества и тем самым снизить трудоемкость эксперимента. Для этого необходимо определить оптимальную точку (рис. 1) для ошибки нейросети и размера обучающей выборки.

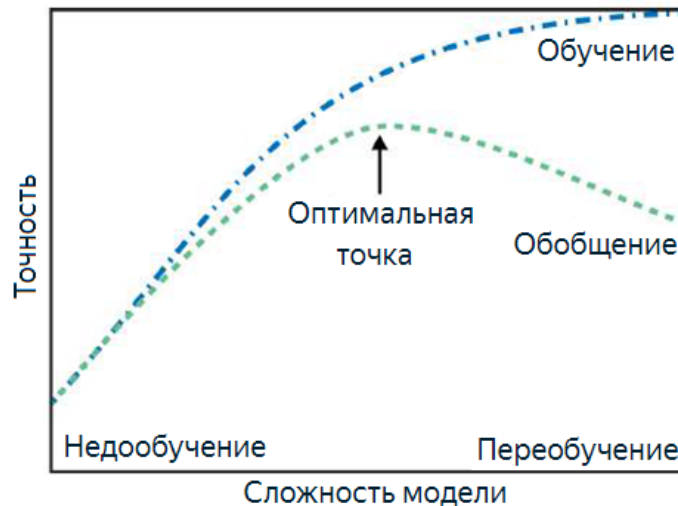


Рис. 1. Оптимальная точка при обучении нейронной сети

С этой целью выполнялось построение нейросетей на объеме данных в 75, 50, 25 и 12 % от исходной выборки. Используемые на каждом срезе значения выборки определялись случайным образом при помощи ГПСЧ Вихря Мерсенна. Код на языке Python для значений без повторений из набора имеет следующий вид (рис. 2):

```

Ввод [1]: import random
UpdatedList = random.sample(range(1, 108), 54)

Ввод [2]: print(UpdatedList)

[81, 21, 2, 26, 61, 70, 83, 90, 84, 106, 22, 30, 59, 63, 107, 40, 100, 88, 1, 29, 16, 91, 94, 44, 47, 53, 42, 14, 54, 27, 86, 9, 17, 33, 35, 71, 38, 103, 25, 50, 48, 46, 82, 77, 6, 80, 51, 23, 12, 87, 95, 93, 28, 101]

```

Рис. 2. Фрагмент кода на Python для получения значений для выборки 50 %

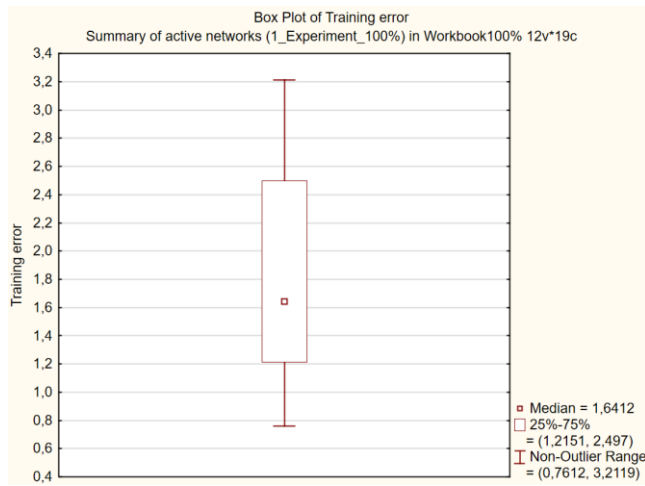
Неиспользуемые значения были исключены из дальнейшего расчета в самой программе Statistica.

На каждом размере выборки строилось по 19 нейросетей, пять сетей – методом автоматического построения с различными функциями активации на скрытом и выходном слоях и 14 сетей – методом многократных подвыборок с изменением числа скрытых нейронов от 4 до 10 с функциями активации: гиперболический тангенс на скрытом слое и линейная – на выходном, что идентично ранее построенной нейросети при полном объеме выборки.

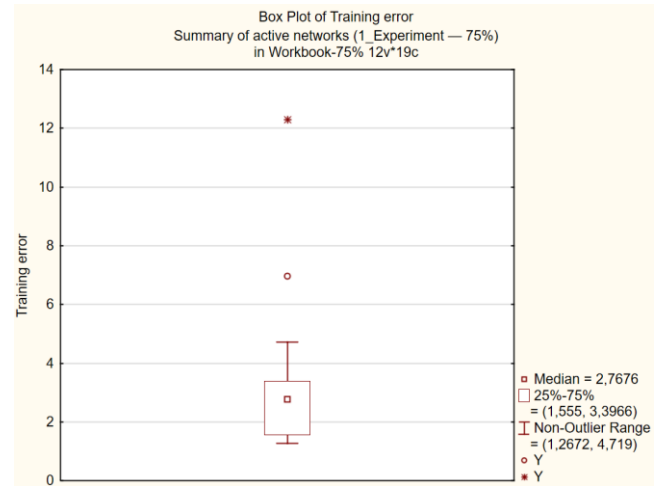
Для удобства представления результатов и сравнения сетей строились диаграммы размаха для каждого размера выборки (рис. 3).

На рис. 3 хорошо видна общая тенденция к снижению качества нейросетей, поскольку разброс значений ошибки обучения при полном размере выборки не превышает показателя 3,2, при 75 и 50 % уже около 3,7–4,7, а на уровне 25 % ошибка возрастает более чем в два раза – 7,9. Увеличение диапазона квартильного размаха ошибки обучения с 1,2–2,5 при полном размере данных до 0,9–3,9 при 25 % выборки также говорит об общем снижении качества сетей с уменьшением объема выборки.

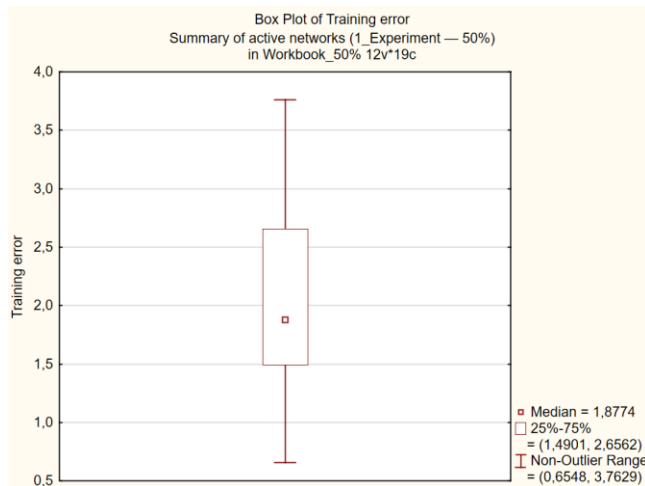
Для выборок 25–100 % все графики обучаемости имеют одинаковый вид (рис. 4, а), и показывают выход на «полку» установившегося (конечного) уровня обучаемости уже после 10–20 итераций. Графики для уровня 12 % (рис. 4, б) носят нестабильный характер вследствие слабой способности обобщать данные на столь малой выборке и полной неспособности их обобщать на тестовом и контрольном множествах. Это свидетельствует о невозможности построения работоспособной сети на выборке 12 %.



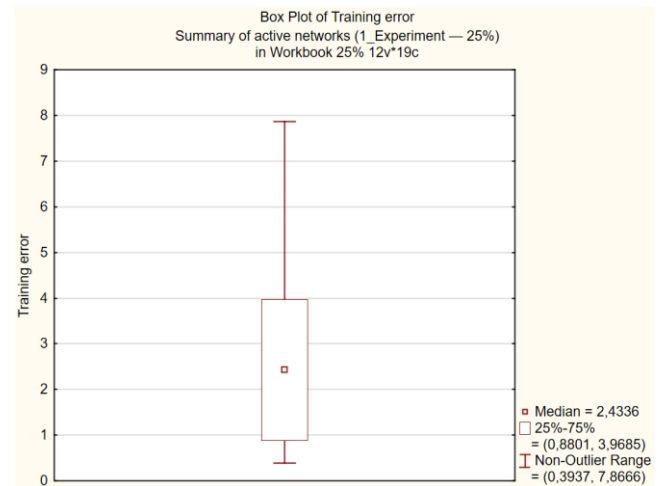
a



б



в



г

Рис. 3. Диаграммы размаха построенных сетей на размере выборки:

a – 100 %; *б* – 75 %; *в* – 50 %; *г* – 25 %

На каждом размере выборки проводился сравнительный анализ нейронных сетей, при котором отбиралась одна с наилучшими показателями по критериям ошибки и производительности (см. табл. 1).

Из табл. 1 видно, что количество нейронов скрытого слоя для наилучшей сети из каждого размера выборки изменяется в узком диапазоне и составляет 7–9. Сеть для 12 % выборки не работает, поэтому значения ошибок на тесте и контроле равны 0.

Таблица 1

Сводная таблица построенных нейронных сетей

Summary of active networks (1 Experiment)								
Sample size, %	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm
100	MLP 3-7-3	0,876595	0,863295	0,830870	0,664223	0,989306	1,319104	BFGS 72
75	MLP 3-8-3	0,883104	0,842357	0,789216	1,29165	0,97411	1,35192	BFGS 34
50	MLP 3-9-3	0,894341	0,854997	0,869244	0,787818	1,625515	0,563376	BFGS 58
25	MLP 3-7-3	0,963086	0,983863	0,717538	0,608084	2,00131	3,03499	BFGS 67
12	MLP 3-6-3	0,970076	0,00	0,00	1,327025	1,93576	1,80678	BFGS 33

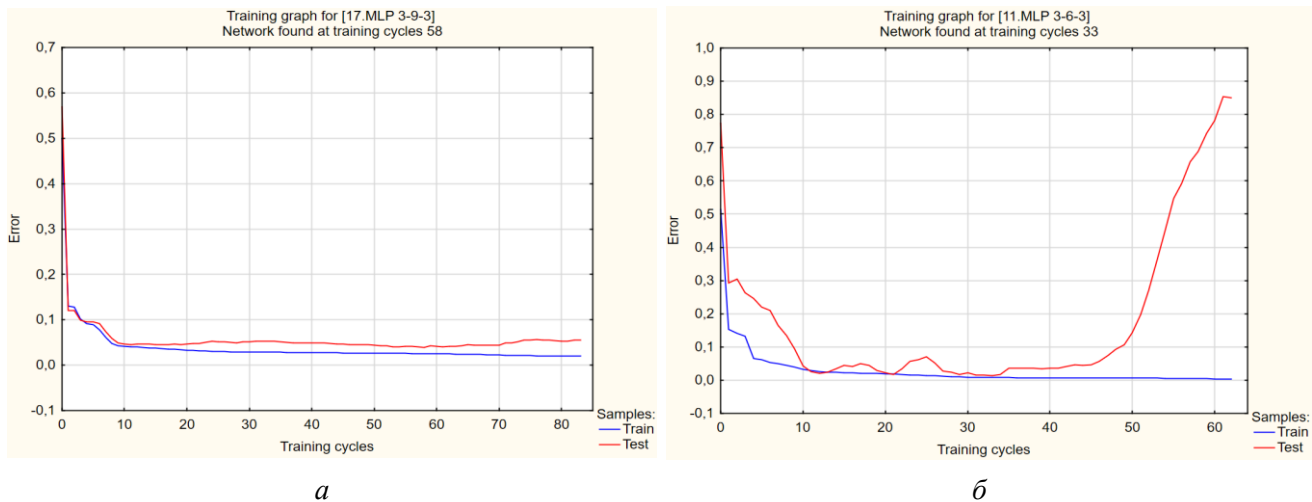


Рис. 4. Графики обучаемости нейросетей при различных размерах выборки:
 a – 25–100 %, b – 12 %

Сравним, насколько точно сети из табл. 1 работают с ограниченными объемами выборки, прогнозируя значения выходных переменных. Для этого в каждую из этих сохраненных сетей загрузим входные переменные из файла примера, на котором происходило обучение полного размера выборки, и посчитаем среднюю относительную ошибку сети для выходных переменных T , $delta$, E (табл. 2).

Таблица 2

Средняя относительная ошибка переменных на разном размере выборки

Sample size, %	Net. name	Predictions spreadsheet (1 Experiment) Network: MLP 3-7-3; MLP 3-8-3; MLP 3-9-3; MLP 3-7-3. Samples: Test Subset of Predictions spreadsheet for (1_Experiment) Variables: 4 Include condition: v0=1		
		MAPE (T)	MAPE (delta)	MAPE (E)
100	MLP 3-7-3	0,0167199531	0,0625048404	0,0972225184
75	MLP 3-8-3	0,0259739929	0,0644203423	0,077925017
50	MLP 3-9-3	0,0234247368	0,0672326041	0,101596934
25	MLP 3-7-3	0,0302049185	0,0769084049	0,161926991

Из табл. 2 следует, что сеть работоспособна и на уровне в 25 % выборки, но уже наблюдается значительное увеличение ошибки по отдельной переменной.

Таким образом, можно сделать вывод, что качественное построение нейронной сети прогнозирования эксплуатационных свойств на примере ШУ возможно на 75 % и даже 50 % экспериментальных данных. Трудоемкость эксперимента при этом сократится пропорционально.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кудинов А.В. Особенности нейросетевого моделирования станков // СТИН. 2001. № 1. С. 13–18.
2. Позевалкин В.В., Поляков А.Н. Исследование эффективности тепловых моделей станка на основе нейронных сетей прямого распространения // СТИН. 2021. № 10. С. 29–32.
3. Кузнецов Д.И. Обоснование технических характеристик гибких производственных модулей нейросетевыми методами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольск.-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2004.

4. Нейронные сети. Statistica Neural Networks: Методология и технология современного анализа данных / Под ред. В.П. Боровикова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 392 с.
5. Денисенко А.Ф., Ладыгин Р.В. Выбор и применение нейронных сетей для моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов / Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Матер. междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: НИЦ МС, 2024. № 7. С. 18–20. DOI: 10.26160/2587-7577-2024-7
6. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс / Пер. с англ. 2-е изд-е. М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ХОНИНГОВАНИЯ

Денисенко А.Ф., профессор, д.т.н., профессор, Гришин Р.Г., доцент, к.т.н., доцент, Антипова Е.Д., аспирант

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

Выведены зависимости, позволяющие определить геометрическую точность поверхности в продольном сечении при хонинговании. Показано распределение съема металла по различным зонам обработки. Доказано, что параметры хонингования влияют на величину припуска и линейные размеры отклонений.

Ключевые слова: хонингование, точность геометрической формы, хонинговальный инструмент, удельный съем металла, перебеж, окружная скорость, возвратно-поступательная скорость, сила прижима бруска, давление в зоне обработки, припуск

CALCULATION OF GEOMETRIC ACCURACY OF THE PROCESSED SURFACE DEPENDING ON HONING PARAMETERS

Denisenko A.F., Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Grishin R.G., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Antipova E.D., PhD student

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

Dependencies are derived to determine the geometric accuracy of the surface in the longitudinal section during honing. The distribution of metal removal across different processing zones is shown. It is proved that the honing parameters affect the amount of allowance and the linear dimensions of deviations.

Keywords: honing, geometric shape accuracy, honing tool, specific material removal, overrun, circumferential velocity, reciprocating velocity, bar clamping force, pressure in the processing area, allowance

Совершенствование методов окончательной обработки деталей является актуальной задачей современного развития машиностроения. Вопросами процесса хонингования занимались такие ученые, как Наерман М.С., Попов С.А., Бабичев А.П., Полянчиков Ю.Н. и др. Важным показателем стабильности процесса являются высокие требования к точности геометрической формы отверстий. В своих работах авторы, опираясь на опытно-экспериментальный путь, выделяют основные параметры, которые влияют на качество обработанной поверхности: окружная скорость хонинговальной головки, сила прижима бруска к обрабатываемой поверхности, время обработки, ширина бруска, коэффициент удельного съема металла и значения перебега [1, 2]. Из-за отсутствия достаточных теоретических обоснований выбора указанных параметров в процессе хонингования предлагается математически рассчитать и обосновать применение данных параметров.

Известно, что процесс хонингования характеризуется двумя движениями хонинговального инструмента (хона): возвратно-поступательным, вращением вокруг оси хона, а также силой прижима бруска в радиальном направлении. Для того чтобы обеспечить снижение погрешности формы поверхности в продольном сечении необходимо рассмотреть условия съема металла (припуск) при возвратно-поступательном и вращательном движении хона.

Величина снимаемого припуска определяется по формуле

$$U = kSp, \quad (1)$$

где k – коэффициент удельного съема материала, S – перемещение точек бруска относительно выбранной точки обрабатываемой поверхности, p – давление в зоне контакта бруска.

На рис. 1 показана расчетная схема определения величины снимаемого припуска. Скорость вращательного движения хона остается постоянной, а возвратно-поступательного – снижается в конце каждого хода. Ввиду этого с торцевых сторон на некоторое время наблюдается задержка хода, отмечается неравенство пути перемещения точек режущей поверхности брусков хона.

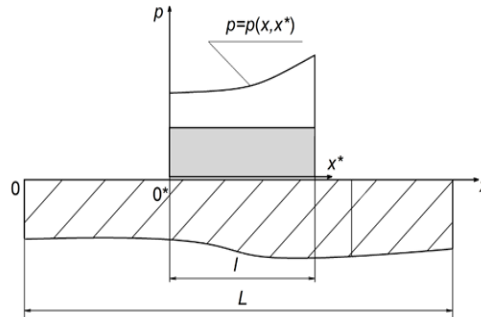


Рис. 1. Расчетная схема для определения величины снимаемого припуска

Чтобы учесть долю общего пути трения, приходящегося на отдельные участки обрабатываемой поверхности, нужно ввести в формулу (1) функцию распределения перемещений в продольном направлении $\alpha(x)$ и функцию перемещения в результате вращения хонинговальной головки $\beta(x)$ [1]. Таким образом, припуск на участке отверстия с координатой x в продольном направлении будет иметь вид

$$U(x) = U_n(x) + U_\theta(x) = k_n V_n \alpha(x) \tau p(x) + k_\theta V_\theta \beta(x) \tau p(x), \quad (2)$$

где $U_n(x)$; $U_\theta(x)$ – функции снимаемого припуска в точке с координатой x , зависящие от перемещения бруска в продольном направлении и вращательного перемещения хона соответственно, k_n и k_θ – коэффициенты удельного съема материала, V_n – возвратно-поступательная скорость хона, V_θ – окружная скорость хона, τ – время работы, $p(x)$ – давление в зоне обработки.

На рис. 2 показана схема распределения давления бруска на отдельных участках обрабатываемой поверхности с учетом симметричности перебега на торцах заготовки и независимости давления от координаты x^* . Согласно схеме, в пределах первого и третьего участков давление остается постоянным, а в пределах второго участка давление бруска снижается за счет увеличения площади контакта бруска с поверхностью.

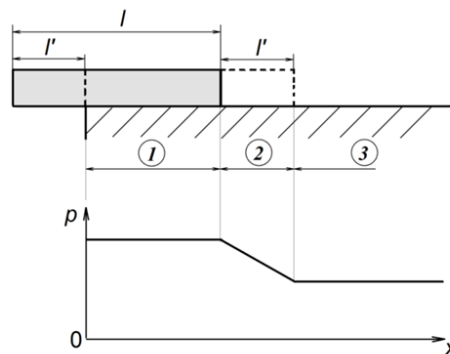


Рис. 2. Схема распределения давления на участках обрабатываемой поверхности:

1 участок – $0 \leq x \leq l - l'$; 2 участок – $l - l' < x < l$; 3 участок – $l < x < L - l$

С учетом изложенного функция снимаемого припуска приобретает вид:

$$U_1(x) = U_{1n}(x) + U_{1e}(x) = k(V_n \alpha_1(x) + V_e \beta_1(x)) p_1 \tau; \quad (3)$$

$$U_2(x) = U_{2n}(x) + U_{2e}(x) = k(V_n \alpha_2(x) + V_e \beta_2(x)) p_2 \tau; \quad (4)$$

$$U_3(x) = U_{3n}(x) + U_{3e}(x) = k(V_n \alpha_3(x) + V_e \beta_3(x)) p_3 \tau. \quad (5)$$

Коэффициент ξ устанавливает зависимость между возвратно-поступательной и окружной скоростями хона [3]:

$$V_n = \xi V_e. \quad (6)$$

Таким образом, полученные зависимости (3)–(5) можно представить в виде

$$\eta_1 = \frac{U_1(x)b}{k\tau V_e P_y}; \quad (7)$$

$$\eta_2 = \frac{U_2(x)b}{k\tau V_e P_y}; \quad (8)$$

$$\eta_3 = \frac{U_3(x)b}{k\tau V_e P_y}, \quad (9)$$

где b – ширина бруска, P_y – сила прижима бруска к обрабатываемой поверхности.

На графиках, приведенных на рис. 3, показано распределение съема материала по трем зонам обработки при различных значениях перебега, где $\varepsilon = l' / l$.

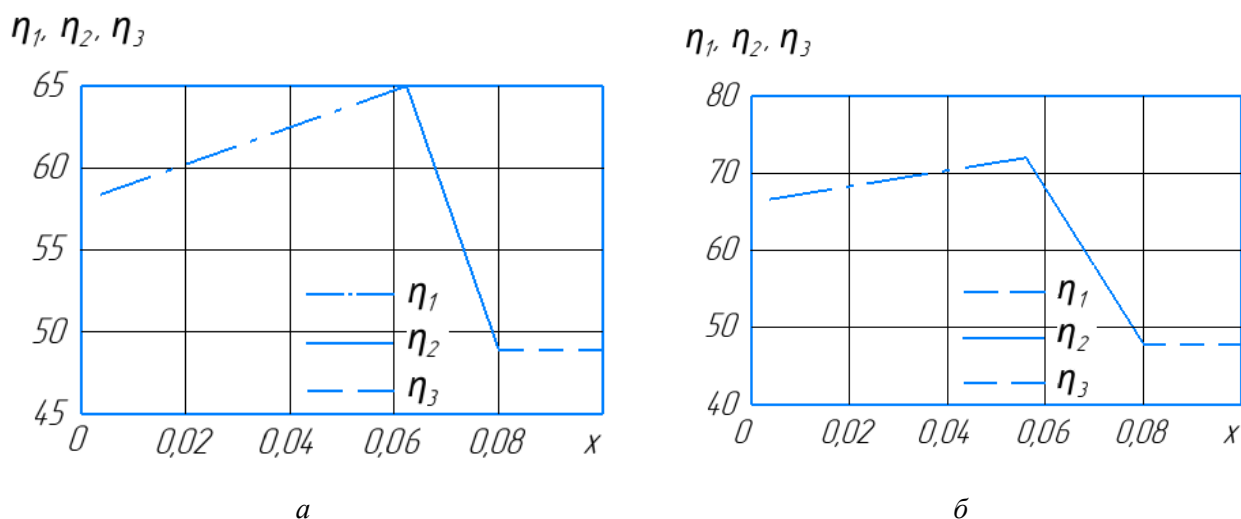


Рис. 3. Распределение съема материала по зонам обработки:
график а – $\varepsilon = 0,25$; график б – $\varepsilon = 0,33$

Из вышесказанного можно сделать вывод, что погрешность обработки в процессе хонингования образуется в результате наличия перебега и может быть снижена при увеличении длины хонинговального бруска, что будет способствовать повышению точности обра-

ботки. С помощью варьирования параметров хонингования (величины перебега, коэффициента удельного съема материала, времени обработки, окружной скорости хона, силы прижима бруска к обрабатываемой поверхности, ширины бруска) можно определить величину припуска и линейные размеры отклонений образующей отверстия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Наерман М.С., Попов С.А. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками. М.: Машиностроение, 1971. 224 с.
2. Хонингование / А.П. Бабичев и др. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. 245 с.
3. Кремень З.И., Стратиевский И.Х. Хонингование и суперфиниширование деталей. Л.: Машиностроение, 1988. 137 с.

РАЗРАБОТКА ТРИПЛЕКСНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ КРУГЛОМЕРОВ

Епифанцев К.В., доцент, к.т.н., доцент, **Петров Г.А.**, к.т.н., доцент, **Егоров А.Э.**, магистрант

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: epifancew@gmail.com*

Рассматривается вопрос применения триплексного датчика емкостно-оптически-вихретокового типа, имеющего предварительную систему преобразования, который был использован как альтернатива контактному щупу на кругломере Roundtest RA – 120p [1]. В настоящее время настройка кругломера с контактными щупами сопровождается дополнительными сложностями в связи с длительной операцией выравнивания стола и осей, а также возможностью повреждения контактного щупа из-за необработанной детали, о которую он истирается. Подобранные характеристики триплексного датчика позволили использовать его вместо контактного щупа при измерении дефектов формы детали (круглости, цилиндричности, биения) для разных материалов. Именно в этом преимущество триплексного датчика – для бесконтактного измерения разных материалов.

Ключевые слова: оптические датчики, вихретоковые датчики, емкостные датчики, дефекты геометрии, кругломер, погрешность измерений

DEVELOPMENT OF A TRIPLEX SENSOR FOR ROUND METERS

Epifantsev K.V., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Petrov G.A., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Egorov A.E.**, Master's Degree student

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: epifancew@gmail.com*

The article considers the issue of using a triplex capacitive-optical-eddy current sensor with a preliminary conversion system, which was used as an alternative to the contact probe on the Roundtest RA – 120p [1]. Currently, setting up a round meter with a contact probe is accompanied by additional difficulties due to the long-term operation of leveling the table and axes, as well as the possibility of damage to the contact probe due to the raw part on which it is worn. The selected characteristics of the triplex sensor made it possible to use it instead of a contact probe when measuring defects in the shape of a part (roundness, cylindricity, concentricity, runout) for different materials. This is the advantage of a triplex sensor – for non-contact measurement of different materials.

Keywords: optical sensors, eddy current sensors, capacitive sensors, geometry defects, round gauge, measurement error

Процесс измерения дефектов формы производится с помощью кругломеров, в основе которых лежит воздушный подшипник вращения, работающий от компрессора и вращающий координатный стол, и контактный щуп, производящий сканирование детали в определенных сечениях для выявления дефектов геометрии (рис. 1).

Современные технологии создания высокоскоростных движителей стремятся минимизировать вибрационные нагрузки при вращении двигателя для повышения КПД установки и увеличения срока службы подшипниковых и кинематических пар.

Именно поэтому развитие приборов данного класса российской разработки является главной задачей отечественного приборостроения. Алгоритм работы программного обеспечения кругломера имеет ряд фильтров, механических компенсаторов, позволяющих достигнуть субмикронной точности на измерениях для определения микродефектов геометрии, которые впоследствии могут приводить к развитию вибрационных нагрузок.

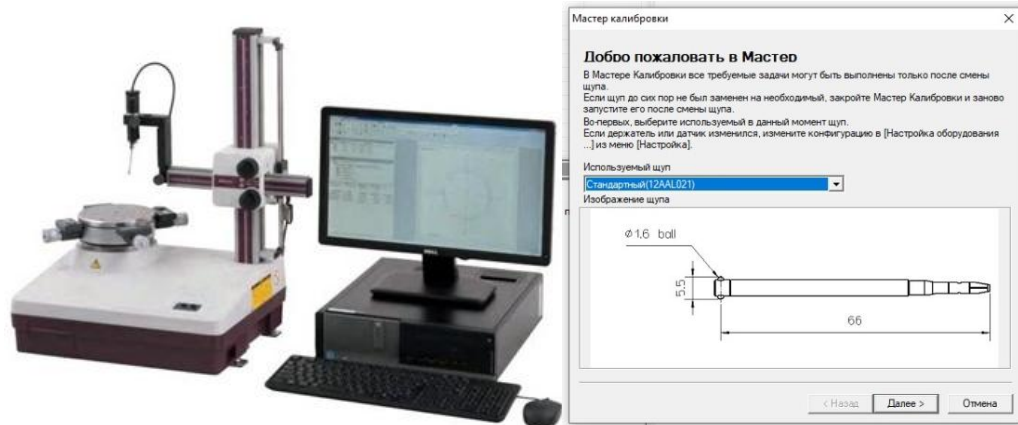


Рис. 1. Стандартный щуп кругломера (справа) и кругломер Roundtest (слева)

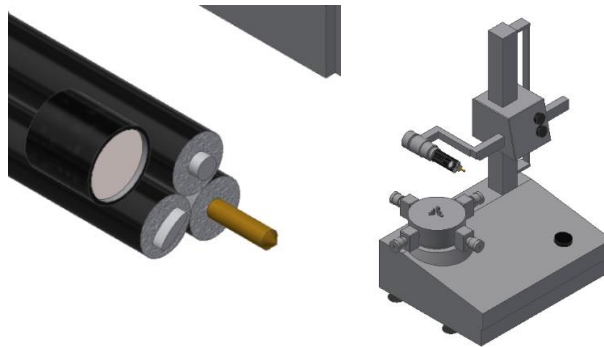
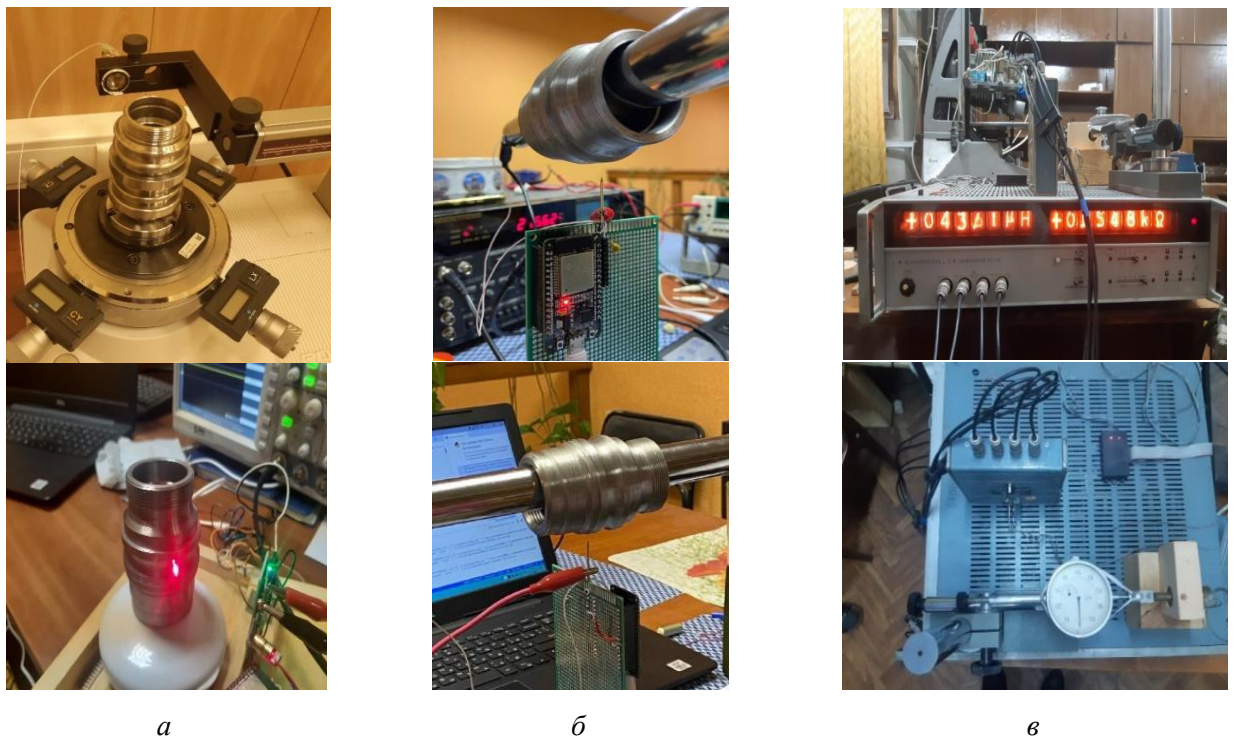


Рис. 2. Пример триплексного щупа (слева) и разработанная конструкция кругломера (справа)



a

б

в

Рис. 3. Испытания с различными типами щупов:
a – оптический датчик с осциллографом и анализатором спектра;
б – емкостной с частотомером и вольтметром;
в – вихретоковый датчик с LCR-метром

Основная цель работы – создать прототип бесконтактного триплексного датчика для измерения дефектов формы с целью импортозамещения контактного щупа австрийского производства (рис. 2).

В исследовании [2] представлен лазерный кругломер О.А. Заякина, который был взят за прототип. На рис. 3 представлены испытанные в разное время щупы различных типов, соединение которых и было положено в основу триплексного щупа.

На фото экрана осциллографа (рис. 4) представлены скачки осциллограммы, которые были зарегистрированы при микросмещении винта и приближении линзы/емкостного/вихретокового датчика к металлической детали. Ниже представлены результаты измерения на датчиках, перечисленные на рис. 3.

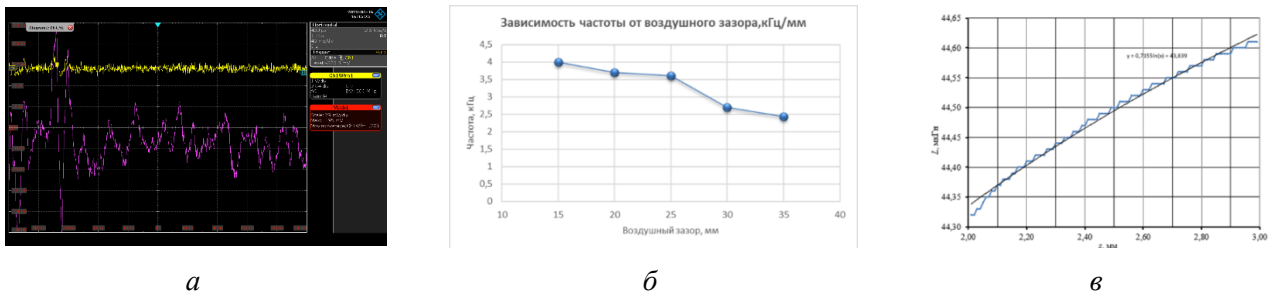


Рис. 4. Графические результаты после испытаний с различными типами щупов:

- а – оптический датчик с осциллографом и анализатором спектра;
- б – емкостной с частотомером и вольтметром;
- в – вихретоковый датчик с LCR-метром

Предлагаемая разработка представляет собой импортозамещенный комплексный датчик, который может быть использован не только для кругломеров, но и для измерения контура и шероховатости при тщательной фильтрации [3].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гущина Е.А., Епифанцев К.В., Ефремов Н.Ю. Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2022. 104 с.
2. Заякин О.А., Манухин А.В., Ростов А.А. Экспериментальный лазерный кругломер, исследование основной погрешности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 6. С. 184–188.
3. 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. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-1-63-76.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ РЕЗЦОВ PDC НА АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Ибатуллин И.Д., д.т.н., профессор, **Колибасов В.А.**, аспирант, инженер

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

Представлены новые методы и разработанное устройство для контроля качества резцов буровых долот с синтетическим поликристаллическим алмазным покрытием (PDC). Это позволяет отсеивать низкокачественные партии резцов и использовать только высококачественные комплектующие для сборки алмазных буровых долот. Проведен анализ повреждаемости PDC-резцов при использовании алмазных долот. Также созданы методика и прибор для оценки стойкости алмазных резцов к абразивному износу при взаимодействии с закрепленным абразивным материалом, что позволило сократить время испытаний. Методика была протестирована и показала свою применимость в условиях производства алмазных долот. В результате проведенных исследований определены оптимальные режимы испытаний.

Ключевые слова: резцы PDC, абразивное изнашивание, алмазный диск, трение, линейный износ, износостойкость, алмазные зубки

A DEVICE FOR TESTING PDC CUTTERS FOR ABRASIVE WEAR

Ibatullin I.D., Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, **Kolibasov V.A.**, PhD student, engineer

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: startup.samgtu@yandex.ru*

This article presents new methods and a developed device for quality control of drill bit cutters with synthetic polycrystalline diamond coating (PDC). This allows to filter out low-quality batches of cutters and use only high-quality components for assembling diamond drill bits. The analysis of the damage of PDC cutters when using diamond bits is carried out. A technique and a device have also been created to assess the resistance of diamond cutters to abrasive wear when interacting with fixed abrasive material, which reduced the test time. The technique has been tested and has shown its applicability in the production of diamond bits. As a result of the conducted research, optimal test modes were determined.

Keywords: PDC cutters, abrasive wear, diamond disk, friction, linear wear, wear resistance, diamond teeth

Материалы, используемые для создания породоразрушающих алмазных резцов, являются одними из самых ненадежных и подверженных большим нагрузкам элементов буровых долот. В большинстве случаев проблемы с долговечностью зубков PDC ограничивают срок службы всего алмазного долота [1–3]. Использование порошковых технологий при производстве зубков приводит к получению материалов с широким разбросом механических свойств даже при соблюдении регламентов. Поэтому наличие сертификата на зубки еще не гарантирует их высокое качество; следовательно, при производстве долот необходимо строго соблюдать входной контроль для зубков, который станет неотъемлемой частью системы качества в долотном производстве.

Работа зубков с алмазным покрытием в условиях внешнего трения в твердых и умеренно абразивных породах при высоких статических и динамических нагрузках требует контроля свойств алмазного покрытия, которые напрямую влияют на эксплуатационную надежность [4]. Характерные виды повреждаемости зубков включают хрупкие сколы режущих кромок, сколы алмазного покрытия вместе с телом зубка, отколы алмазного покрытия от зубка, а также абразивное изнашивание материалов покрытия и основы. Важно отметить, что при входных испытаниях первоочередной контроль должен быть направлен на эти свойства алмазного покрытия (рис. 1).



Рис. 1. Повреждение PDC зубков в ходе эксплуатации:
1 – хрупкие сколы режущих кромок; 2 – абразивное изнашивание

Наибольшую эффективность в ходе экспериментальных исследований показал метод, где алмазный зубок изнашивается путем контакта его кромки с торцовой поверхностью рабочей части алмазного отрезного диска. Данный алмазный отрезной диск закреплен в оправке, которая устанавливается в патрон сверлильного станка (рис. 2).



Рис. 2. Испытание зубков на абразивное изнашивание из-за трения об алмазный отрезной диск

Испытуемый зубок устанавливают в специальную оправку (рис. 3), обеспечивающую угол наклона зубка к поверхности контртела (алмазного отрезного диска), идентичный углу наклона зубков в реальных алмазных долотах.



Рис. 3. Установка алмазного зубка в оправку

Для испытаний применяли алмазные отрезные диски с диаметром 115 мм, которые доступны в любых строительных магазинах. Один алмазный отрезной диск можно использовать два раза (по одному разу с каждой стороны).

В процессе экспериментов с алмазными зубками с конической вершиной изнашивание проводилось как по вершине, так и по кромке. Для этого зубки были закреплены в оправках, установленных в измерительном блоке. Данные о нагрузке и трении были записаны с помощью датчиков и передавались на компьютер через сертифицированную систему сбора данных E 14-440 производства фирмы L-Card. Для отслеживания эксперимента в режиме реального времени использовалось программное обеспечение PowerGraph.

Испытания на изнашивание проводились для определения двух характеристик износа. Первая характеристика – линейный износ, который определялся путем сравнения показаний микрометрического индикатора часового типа до и после испытаний. Вторая характеристика – ширина лыски на кромке зубка (рис. 4), которая формировалась в процессе изнашивания. Размер лыски измерялся с помощью цифрового микроскопа. В результате испытаний получалось четкое пятно износа, которое позволяло легко сортировать зубки по степени износостойкости.

В результате проведенных исследований выбраны следующие рациональные режимы испытаний:

- нормальная нагрузка на контакт «диск – кромка зубка» – 25 кгс;
- частота вращения диска – 200 мин^{-1} ;
- длительность испытаний – 10 мин;
- вид трения – сухое трение скольжения.

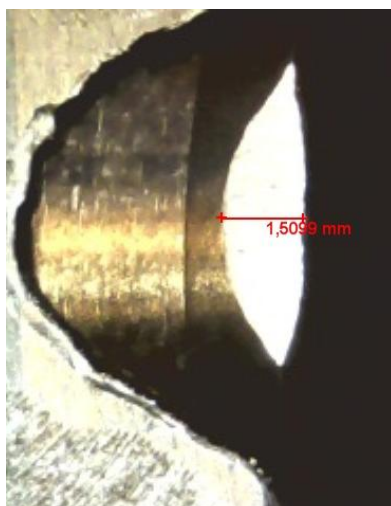


Рис. 4. Ширина лыски на кромке зуба

Методика испытаний на абразивное изнашивание выполняется по следующим этапам:

1. Предварительно включают измерительную систему и дают прогреться датчикам в течение 15 мин.
2. Устанавливают зубок в оправке и измеряют начальную высоту кромки зубка (в наиболее высокой части).
3. Устанавливают алмазный диск в оправке неизношенной стороной вниз (противоположно хвостовику оправки) и закрепляют оправку в патроне станка.
4. Оправку с зубком фиксируют во втулке измерительного блока так, чтобы кромка зубка касалась алмазного диска в центральной зоне алмазосодержащего слоя.
5. Выбирают нагрузку на рычаг, обеспечивающую осевую нагрузку на контакт «кромка зубка – диск» и составляющую около 25 кгс (250 Н).

6. Разгружают контакт и обнуляют показания датчиков осевой нагрузки.
 7. Включают стенд, запускают на компьютере сбор данных и плавно опускают вращающийся алмазный диск на кромку зубка.
 8. Проводят испытания в течение 10 мин.
 9. Измеряют среднюю температуру нагрева зубка термопарой К-типа.
 10. Останавливают стенд, разгружают узел трения и прекращают сбор данных.
 11. Вынимают зубок из измерительного блока (во избежание ожогов необходимо предварительно остудить зубок или надеть термоизолирующую перчатку) и измеряют высоту зубка после изнашивания. Рассчитывают линейный износ зубка.
 12. Зубок в оправке устанавливают под электронный микроскоп и определяют размеры пятна износа. Заносят все данные в протокол испытаний.
- Если необходимо, испытания можно проводить на одном зубке до 4–5 раз, при этом поворачивая его вокруг своей оси и выставляя вперед неизношенные участки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяк А.Я., Кузнецова А.В., Борисов К.А. Определение поломок резцов PDC с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования // Известия Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2019. 330 (5). С. 169–177.
2. Богомолов Р.М., Сериков Д.Ю. Совершенствование вооружения шарошечного бурового долота // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса: науч.-техн. журнал. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ». 2018. № 5. С. 24–28.
3. Васильев А.А., Сериков Д.Ю., Близиюков В.Ю. Совершенствование буровых долот различных типов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море: науч.-техн. журнал. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ». 2019. № 6. С. 28–31.
4. Стенд и методики испытаний опор шарошечных буровых долот / Н.С. Нассиф, И.Д. Ибатуллин, В.И. Кремлев, В.Е. Барынкин // Вестник Самар. гос. аэрокос. ун-та им. академика С.П. Королева (нац. исслед. ун-та). 2006. (2–2). С. 240–244.

МЕТОД КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА

Китаев А.А.¹, начальник лаборатории специальных испытаний, инженер-конструктор,
Андрюхина Т.Н.², доцент, к.п.н., доцент

¹ *ОАО Прогресс, г. Самара, Российская Федерация*

² *Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация*
E-mail: tat9168.1@yandex.ru

Представлен усовершенствованный метод для контроля геометрических параметров фланцев с использованием возможностей лазерного трекера. Отмечено, что лазерный трекер при наличии специальных, разработанных под индивидуальные задачи приспособлений, может работать в режиме сканирования аналогично стационарным координатно-измерительным машинам с сопоставимой точностью и всеми преимуществами данной системы.

Ключевые слова: точность, лазерный трекер, приспособление, поверхность

METHOD OF MONITORING OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF SEALING SURFACES USING LASER TRACKER

Kitaev A.A.¹, Head of the Laboratory of Special Tests, Design Engineer,
Andryukhina T.N.², Associate Professor, PhD in Pedagogical Science, Associate Professor

¹ *JSC Progress, Samara, Russian Federation*

² *Samara State Technical University, Samara, Russian Federation*
E-mail: tat9168.1@yandex.ru

An improved method for monitoring the geometric parameters of flanges using the capabilities of a laser tracker is presented. It is noted that the laser tracker, in the presence of special devices designed for individual tasks, can operate in a scanning mode similar to stationary coordinate and measuring machines with comparable accuracy and all the advantages of this system.

Keywords: accuracy, laser tracker, accessory, surface

В аэрокосмической промышленности часто применяются детали с повышенными требованиями к точности исполнения поверхностей. Такими, например, являются уплотнительные поверхности фланцев в системе подачи топлива ракетносителей (РН).

Высокие требования к точности геометрии формы фланцев обусловлены тем, что они должны обеспечивать надежное и герметичное соединение между компонентами системы, предотвращая утечки и обеспечивая безопасность в условиях экстремальных нагрузок и давлений во время запуска и полета РН.

Существует множество способов контроля геометрии уплотнительных поверхностей:

- контроль на стационарной координатно-измерительной машине (КИМ);
- метод «слепка» и применение видеоизмерительного микроскопа;
- метод контроля на краску и т. д.

Однако в условиях производства данные способы по тем или иным причинам могут быть недоступны.

Метрологическая лаборатория ОАО «Прогресс» получила задачу проконтролировать геометрию сферической уплотнительной поверхности фланца после приварки его к трубопроводу диаметром 400 мм.

При сварке деталей всегда существует риск того, что фланец может деформироваться из-за теплового воздействия. Важно убедиться в отсутствии деформации и соответствии конструкторским допускам Н12 геометрии уплотнительной поверхности.

Сборка системы подачи топлива РН имеет массу более полтонны, большие габаритные размеры и ограничения при кантовании, поэтому КИМы и прочие лабораторные методы высокоточных измерений не могут быть применены. Для контроля уплотнительной поверхности фланца нами был выбран высокоточный лазерный трекер API RADIANT R20 [1].

Лазерный трекер представляет собой следящую измерительную систему. Он позволяет определить пространственные координаты точки, заданной отражателем, в сферической системе координат (рис. 1).

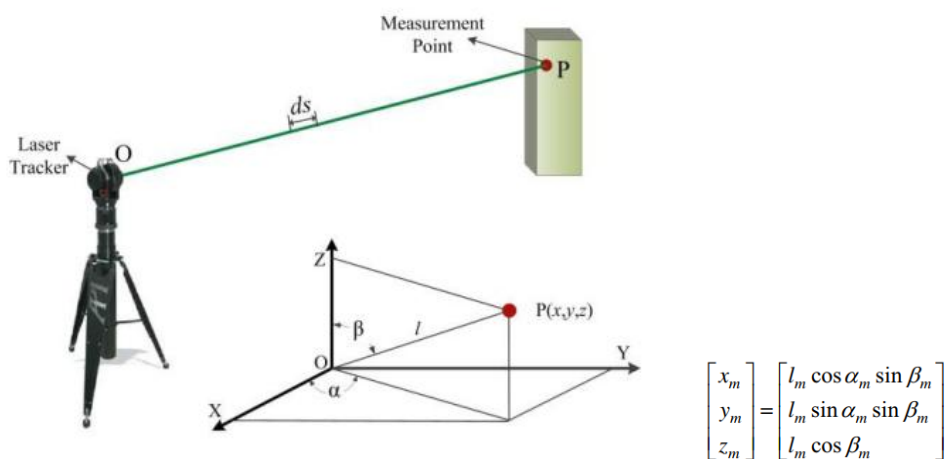


Рис. 1. Модель измерения, проводимого лазерным трекером

В качестве отработки технологии измерения был взят образец похожего фланца до приварки к трубопроводу с меньшим диаметром, равным 140 мм.

Определение координат точек на уплотнительной поверхности фланца первоначально было проведено посредством касания вручную измерительным инструментом. Сферический отражатель непрерывно ведется по всей площади измеряемой поверхности фланца, при этом выполняется автоматическая фиксация в программном обеспечении координат с шагом 1 мм.

Для удобства и обеспечения максимально подробных данных об отклонениях исследуемой поверхности выполняется фиксация координат точек с шагом 1 мм по горизонтали и вертикали.

Программное обеспечение лазерного трекера позволяет задать «шаг сканирования», а расстояние между линиями сканирования подбирается вручную.

На рис. 2 изображено полученное облако точек, векторная схема и график отклонений от математической модели, полученные при выполнении измерений вручную.

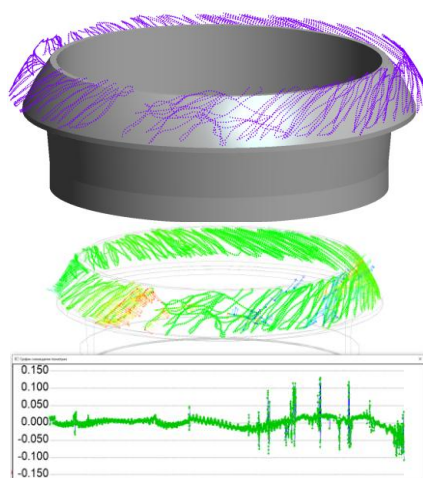


Рис. 2. Полученное облако точек, векторная схема и график отклонений от математической модели

Как видно из графика, в процессе выполнения измерений поверхности фланца вручную с помощью отражателя и при отсутствии специальных приспособлений не обеспечены ни однородность, ни плотность облака точек.

На следующем этапе контроля поверхности фланца был опробован способ ведения отражателя по фланцу вдоль линейки. Использование линейки обеспечило прямолинейность и точности шага между рядами 1 мм. Данный способ оказался очень трудоемким и долгим, так как при выполнении измерений у оператора были задействованы обе руки, которые находились в постоянном напряжении. На результаты измерений также оказало влияние прерывов на отдых, что и сказалось на результатах измерения (рис. 3).

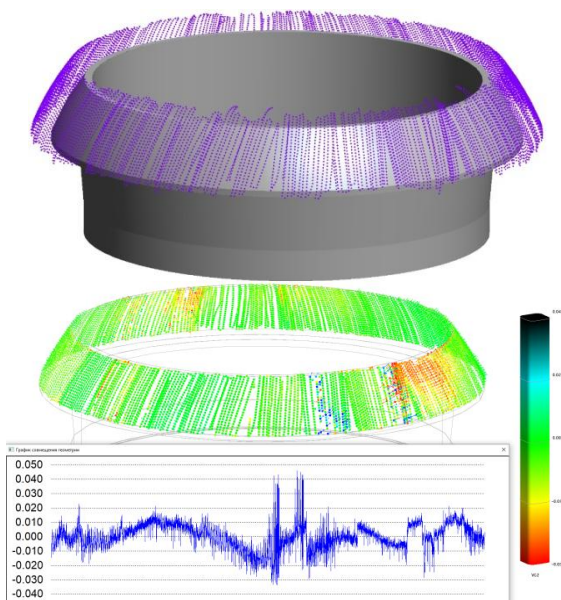


Рис. 3. Облако точек, векторная схема и график отклонений от математической модели при ведении отражателя по фланцу вдоль линейки

На рис. 3 видно, что достигнута приемлемая однородность и плотность облака точек, но график отклонений показал резкие скачки в моменты прерывания измерений при потере лазерного луча и при необходимости отдыха для рук.

Повторный замер данным способом показал, что помимо вышеуказанных причин на точность влияет также точность центрирования призмы отражателя относительно его наружной сферической поверхности.

При выполнении измерений фланца с помощью лазерного трекера использование разных сторон отражателя в процессе измерений вносит погрешность центрирования, которая составляет 0,01 мм [1]. Следовательно, необходим способ, при котором используется только одна сторона сферического отражателя. Это не избавит от погрешности 0,01 мм, так как изначально неизвестно, какая сторона является «точной», но сделает векторную схему отклонений и график более читаемыми за счет отсутствия скачков.

Очевидно, что необходима некая регулируемая опора для отражателя, которая позволит вести его точно по линии и по завершении перемещаться на 1 мм. В качестве эксперимента была собрана конструкция (рис. 4), состоящая из трех болтов и листа плотного картона с вырезом под фланец. Суть состояла в том, что отражатель нужно вести по окружности, одновременно касаясь поверхности фланца и плоскости картона. Лазерный трекер при этом должен находиться примерно на оси фланца, так как только при таком положении возможно использование одной стороны отражателя. После каждого круга болты необходимо повернуть на заранее просчитанный угол так, чтобы плоскость поднялась на 1 мм.

Результат измерений данным способом показан на рис. 4. Облако точек достаточно равномерное, за исключением мест прогиба картона. На графике отсутствуют резкие скачки, графическая схема характеризуется плавными переходами цветов, а общая картина отклоне-

ний показывает логичную овальность фланца в пределах допусков. Повторный замер показал идентичную графическую схему с разницей значений максимальных отклонений, не превышающей 0,005 мм.

Таким образом, найден способ измерения уплотнительной поверхности фланца, удовлетворяющий всем предъявляемым требованиям.

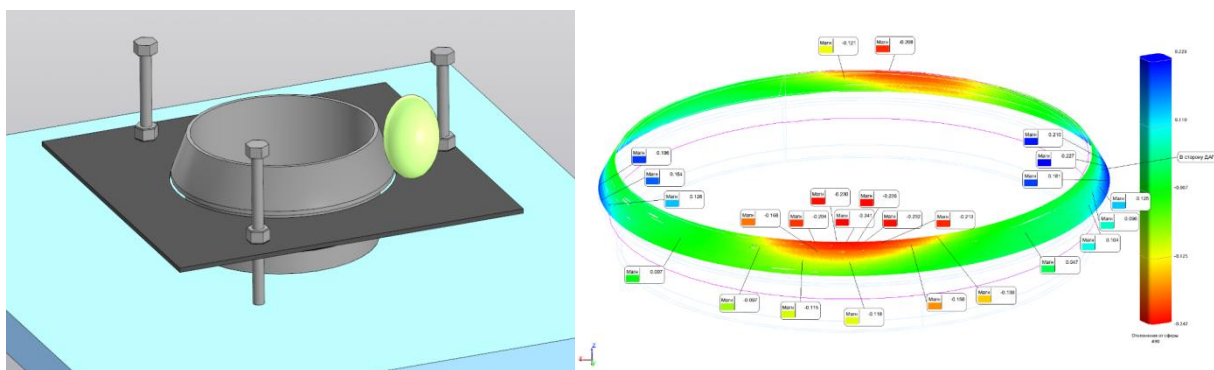


Рис. 4. Результат измерений с использованием регулируемой опоры

Рассмотренный метод измерения показывает, что лазерный трекер при наличии специальных разработанных под индивидуальные задачи приспособлений, может работать в режиме сканирования аналогично стационарным координатно-измерительным машинам с меньшей, но сопоставимой точностью и со всеми преимуществами данной системы, а именно мобильностью и диапазоном габаритов измеряемых объектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Системы лазерные координатно-измерительные. Компания «Комплексное материально-техническое обеспечение». URL: <https://kmtto-spb.ru>

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ РАСХОДА ГАЗА

Малкина И.В., ст. преподаватель, Кляшторная Н.Л., студент

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

Рассмотрены методы контроля газовых потоков. Объектом исследования являются промышленные газопроводы протяженностью от скважины до промежуточного потребителя. Для решения поставленной задачи проведен анализ типов накладных ультразвуковых расходомеров, представлена структурная схема инвариантной информационно-измерительной системы расхода газа, рассмотрена методика выполнения измерений с точностным анализом погрешности измерения.

Ключевые слова: методы контроля расхода газа, ультразвуковые расходомеры, инвариантная информационно-измерительная система, точность измерений

METROLOGICAL SUPPORT OF THE GAS FLOW CONTROL PROCESS

Malkina I.V., senior lecturer, Klyashtornaya N.L., student

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

The paper discusses methods for monitoring gas flows. The object of the study is field gas pipelines extending from the well to the intermediate consumer. To achieve the task, an analysis of the types of overhead ultrasonic flow meters was carried out, a block diagram of an invariant information-measuring system for gas flow was presented, and a measurement technique was considered with an accurate analysis of the measurement error.

Keywords: gas flow control methods, ultrasonic flowmeters, invariant information and measurement system, measurement accuracy

При рассмотрении основных аспектов современной газовой отрасли на первое место выходит задача контроля и учета природного и нефтяного попутного газа, транспортируемого по трубопроводам значительной протяженности. Контроль газовых потоков реализует эффективность технологического оборудования, экономит природное сырье, оптимизирует коммерческие взаиморасчеты.

Объектом контроля является участок магистрального газопровода ПАО «Газпром». Предприятие осуществляет транспортировку более 15 % объемов всего добываемого Газпромом природного газа.

Современный рынок метрологического оборудования для контроля расхода сырья в нефтегазовой отрасли представлен устройствами на базе измерительных диафрагм, вихревых, турбинных и ультразвуковых расходомеров (рис. 1). Предпочтение отдается ультразвуковым расходомерам (УЗР) в силу простоты их конструкции, монтажных работ и обслуживания, а также высокой точности измерений и надежности.



Рис. 1. Виды расходомеров

И накладные, и врезные УЗР имеют жесткую конструкцию, не подвержены влиянию гидро- и пневмоударов, не препятствуют течению потока измеряемой среды, не создают потерь давления. Достоинством накладных расходомеров также является отсутствие фланцевых соединений и импульсных трубок, которые служат причиной утечки взрывоопасных и ядовитых газов [1].

Контроль расхода методом перепада давления с помощью накладных УЗР имеет некоторый недостаток: на точность измерений влияет коэффициент истечения:

$$K_{ИСТ} = \frac{\text{Расход}_{\text{действительный}}}{\text{Расход}_{\text{теоретический}}}.$$

Значение данного коэффициента сильно подвержено влиянию возмущающих факторов, таких как изменение геометрии диафрагмы датчика; эксплуатационное притупление входной острой кромки измерительного прибора; наличие изменяющейся шероховатости исследуемого трубопровода; изменение расстояния между внутренними сопротивлениями в измерительном трубопроводе и т. д. Данные возмущения оказывают существенное влияние на изменение значения $K_{ИСТ}$, что неизменно ведет к увеличению общей составляющей погрешности измерения во время эксплуатации технического устройства.

Уравнение расхода представлено формулой

$$Q = K_{ИСТ} E \xi F_o \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (1)$$

где ε – коэффициент расширения, учитывающий увеличение удельного объема для газа;

$F_o = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь отверстия сужающего отверстия;

ρ – плотность;

Δp – перепад давления, создаваемый сужающим устройством;

$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ – коэффициент скорости входа, учитывающий влияние начальной скорости потока на образование коэффициента расхода;

$K_{ИСТ}$ – коэффициент истечения.

Коэффициент расхода характеризуется формулой $\alpha = K_{ИСТ} \times E$ [1, 2]. Суть улучшения точностных характеристик процесса измерения заключается в замене базовой системы расхода газа на инвариантную.

Математическое описание контроля расхода газа модернизированной информационно-измерительной системы (ИИС) позволяет избавиться от спорной величины (коэффициент истечения) в расчетах. Уравнение расхода видоизменяется от выражения (1) к выражению (2), при этом точность измерения повышается, так как влияние возмущающих факторов нивелируется. Выражение (2) определяет и название внедряемой системы (рис. 2) [2].

При замкнутом кране К контроллер автоматизированной системы запоминает значения q и Δp_2 и производит расчет расхода газа по формуле

$$Q = \frac{q \sqrt{\Delta p_1}}{\sqrt{\Delta p_1} - \sqrt{\Delta p_2}} = \frac{q}{1 - \sqrt{\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1}}}. \quad (2)$$

Метод перепада давления предполагает контроль расхода газа на входе в измерительное устройство и выходе из него. Работа ИИС считается сбалансированной, если величина давления является const.



Рис. 2. Структурная схема ИИС:

СУ – сужающее устройство; Д₁ – датчик перепада давления; ОР – эталонный расходомер; Δр₁ – величина перепада давления при разомкнутом кране К; Q – расход газа, проходящего через СУ; q – расход газа, проходящего через ОР; Δр₂ – перепад давления, пропорциональный Q-q

В качестве измерительного устройства рассматриваемой информационно-измерительной системы выбран датчик с вычислителем расхода «ГиперФлоу-3Пм» КРАУ1.456.001-06.

Принцип работы комплексного датчика расхода «ГиперФлоу-3Пм» (рис. 3) полностью реализует выбранный метод контроля расхода газа. Данное устройство может использоваться для измерения параметров потока газа (жидкости) методом переменного перепада давления на всех стандартных сужающих устройствах, является регистрирующим устройством, т. е. сохраняющим измерительную информацию, также есть возможность анализа температурных режимов. Устройство полностью сопрягаемо с современными системами автоматизации.

Достоинства: высокая точностью и реверсивность измерений; простота установки и обслуживания; возможность хранения измерительной информации; взрывозащищенное исполнение [3].

При сравнении с другими датчиками можно выделить следующие преимущества: защита от влияния внешних факторов (вибраций, статического давления, температурных перепадов); непрерывный режим самодиагностики; стабильность метрологических характеристик; стойкость к перегрузкам (до 25 раз), что дает возможность осуществлять измерительный процесс при высоком давлении перегрузки; хороший интерфейс, наглядная индикация, широкие функциональные возможности.

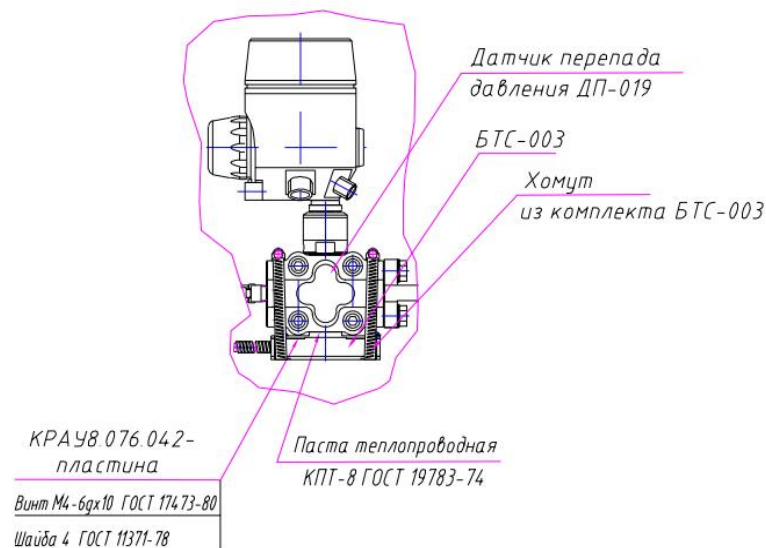


Рис. 3. Схема «ГиперФлоу-3Пм»

Качество измерений определяется множеством факторов. Следовательно, общая погрешность измерений будет состоять из суммы множества элементов: инструментальной погрешности, погрешности метода, температурной погрешности и т. д., но основная погрешность вычисляется как

$$P_Q = \sqrt{(P_q)^2 + 0,25\left(\frac{Q}{q} - 1\right)^2 \left[(P_{\Delta p_1})^2 + (P_{\Delta p_2})^2 \right]}, \quad (3)$$

где P_q – относительная погрешность УЗР;

$P_{\Delta p_1}$ – относительная погрешность измерения давления Δp_1 ;

$P_{\Delta p_2}$ – относительная погрешность измерения давления Δp_2 ;

P_Q – относительная погрешность измерения расхода газа системой.

Представленная информационно-измерительная система использует удобный бесконтактный метод измерения с помощью накладных УЗР, не требующих врезки в трубопровод, может работать с газопроводами больших объемов. Учитывает специфику газовой отрасли – взрывоопасность и большой гистерезис температурных характеристик. В конструкции использованы современные высокотехнологичные материалы, обеспечивающие защиту от механических повреждений, главное ее достоинство – не требуются поверочные образцовые установки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ультразвуковые расходомеры газа с накладными датчиками / А.Д. Мансфельд, А.Г. Санин, Г.П. Волков, Р.В. Беляев, Д.В. Мороскин // II Всероссийская акустическая конференция, совмещенная с XXX сессией Российского акустического общества. Нижний Новгород, 2017. Программа и аннотации докладов. С. 151.
2. Латышев Л.Н., Даев Ж.А. Система измерения расхода газа, исключая влияние коэффициента истечения. Уфимский государственный нефтяной технический университет. URL: <http://www.ogbus.ru>
3. Датчики комплексные с вычислителем расхода ГиперФлоу-3Пм. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/15646-14-giperflou-3pm-8355>

СИНТЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ЛОПАТОК ГТД

Михайлов А.Н.¹, д.т.н., профессор, Анастасьев А.В.¹, аспирант,
Пичко Н.С.², д.ф.н., профессор

¹ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

² Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске,

Российская Федерация

E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

Описана методика синтеза функционально-ориентированного технологического обеспечения для отделочно-упрочняющей обработки, а именно поверхностно-пластического деформирования лопаток газотурбинного двигателя. Рассмотрен процесс синтеза на конкретном примере разработки устройства для ударного упрочнения входной кромки лопатки. Описаны гипотетические схемы устройства в целом и его компонентов в отдельности, а также потенциальных компоновок.

Ключевые слова: лопатка, упрочнение, поверхностно-пластическое деформирование

SYNTHESIS OF FUNCTIONAL-ORIENTED TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR SURFACE-PLASTIC HARDENING OF GTE BLADES

Mikhaylov A.N.¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Anastasyev A.V.¹, PhD student,
Pichko N.S.², Grand PhD in Philological Sciences, Professor

¹ Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, Russian Federation

² Branch of Ukhta State Technical University in Usinsk, Russian Federation

E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

The article describes a method for synthesizing function-oriented technological support for finishing and strengthening treatment, namely surface-plastic deformation of gas turbine engine blades. The synthesis process is considered using a specific example of the development of a device for impact hardening of the leading edge of a blade. Hypothetical diagrams of the device as a whole and its components separately, as well as potential layouts, are described.

Keywords: blade, hardening, surface-plastic deformation

Одним из способов повышения эксплуатационных характеристик лопаток ГТД являются методы поверхностно-пластического деформирования (ППД). Такие методы упрочняющих технологий включают в себя: раскатывающие методы чистовой обработки, вибрационные, пневмо- и гидродробеструйные, обкатку роликами, алмазное выглаживание, дорнование, а также другие методы чистовой обработки поверхности деталей [1]. Применение таких методов позволяет достичь следующих характеристик: устранение неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений, наведенных при механической обработке, создание благоприятного микрорельефа поверхности при сохранении или уменьшении параметров шероховатости поверхности, стабилизацию степени наклепа и т. д. [2].

При этом ряд методов ППД в силу их технологических особенностей имеет определенные ограничения на применение.

Целью данной работы является синтез функционально-ориентированного технологического обеспечения (ФОТО) для поверхностно-пластического деформирования лопаток ГТД с учетом их сложного пространственного профиля.

Для решения поставленной задачи необходимо решение ряда проблем, а именно: определение характерных зон на теле пера лопатки, определение метода формирования технологических воздействий, синтез вариантов их реализации.

Основываясь на анализе характерных разрушений лопаток и структуре вызывающих их эксплуатационных воздействий [3, 4], можно выделить характерные зоны [5], обработке которых необходимо уделить максимальное внимание. К этим зонам можно отнести входную и выходную кромки, а также корытце в центральном сечении. Для детального рассмотрения выберем входную кромку, поскольку это наиболее нагруженный функциональный элемент лопатки.

Формирование упрочненного слоя происходит путем многократного соударения рабочего элемента и упрочняемой детали. Благодаря возможности применения различных типов привода и их характеристик возможна реализация широкого спектра технологических воздействий за счет большого диапазона как величины соударений, так и их амплитуды.

Для достижения поставленной цели необходимо обеспечить локализацию технологических воздействий, что будет являться первым этапом синтеза ФОТО.

Синтез ФОТО проведем на основе морфологического анализа, позволяющего получить множество различных вариантов структуры материального оснащения. Для начала процесса задаемся исходными и базовыми характеристиками, каждой из которых назначаем определенную кодировку, приведенную в таблице.

Описание базовых характеристик структурного синтеза ФОТО

№ п/п	Базовая характеристика	Вариант реализации	Код
1	Механические характеристики заготовки	Высокая склонность к ППД	A1
		Средняя склонность к ППД	A2
		Низкая склонность к ППД	A3
2	Геометрические параметры упрочняемой зоны	Свободные	B1
		Условно ограниченные	B2
		Существенно ограниченные	B3
3	Количество и расположение рабочих элементов устройства	Единичное	C1
		Ромбическое	C2
		Цилиндрическое	C3
4	Относительные механические характеристики рабочей части устройства	Минимальные габариты рабочей части	D1
		Умеренные габариты рабочей части	D2
		Максимальные габариты рабочей части	D3
5	Исполнение	Вертикальное	E1
		Горизонтальное	E2
		Портативное	E3
6	Привод механизма	Механический	F1
		Электрический	F2
		Пневматический	F3
		Гидравлический	F4
		Комбинированный	F5

Задавшись приведенными базовыми характеристиками, процесс синтеза можно представить в виде структурного кода (1) и графа (рис. 1):

$$W_x \rightarrow A_i - B_j - C_k - D_h - E_m - F_n, \quad (1)$$

где $A_i, B_j, C_k, D_h, E_m, F_n$ – базовые характеристики;

i, j, k, h, m, n – варианты реализации базовых характеристик в соответствии с кодировкой, представленной в таблице.

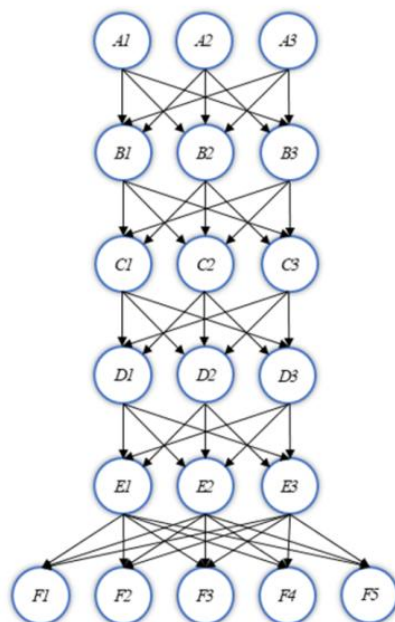


Рис. 1. Граф процесса синтеза ФОМО

Дальнейший процесс синтеза рассмотрим на примере устройства для поверхностно-пластического упрочнения, схема которого представлена на рис. 2. Так, в простейшем варианте устройство включает в себя ударник 1, установленный в корпусе 2 и приводимый в рабочее положение пружиной 3. Рабочий элемент приводится в действие пятой валом 4, на котором закреплен подвижный торцевой кулачок 5, который при вхождении в зацепление с неподвижным торцевым кулачком 6 обеспечивает его рабочий ход. Вал 4 приводится в движение от вала электропривода 7, соединенного через компенсирующую муфту 8.

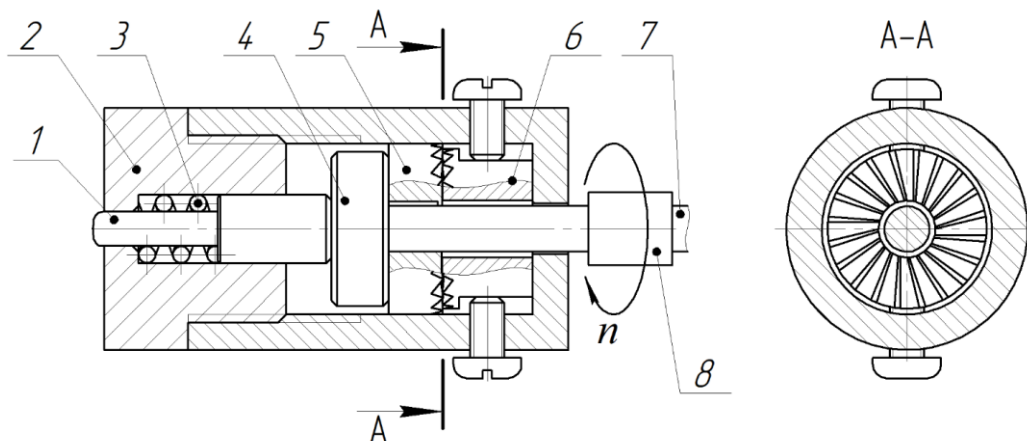


Рис. 2. Общий вид устройства для поверхностно-пластического упрочнения

При этом конфигурация и вид рабочего органа будут зависеть от геометрических параметров упрочняемой зоны, а физико-механические свойства, а также геометрические параметры упрочняемых зон определяют особенности конструкции привода. В зависимости от особенностей упрочняемой зоны конфигурация рабочей зоны может включать в себя n ударников, расположенных согласно одной из схем, представленных на рис. 3.

Количество рабочих элементов, их диаметр и взаимное расположение будут зависеть от физико-механических свойств материала лопатки, ее геометрических параметров и других факторов. Это может обеспечить как повышение производительности устройства, так и более равномерные воздействия за счет увеличения одновременного количества точек, подвергающихся упрочнению.

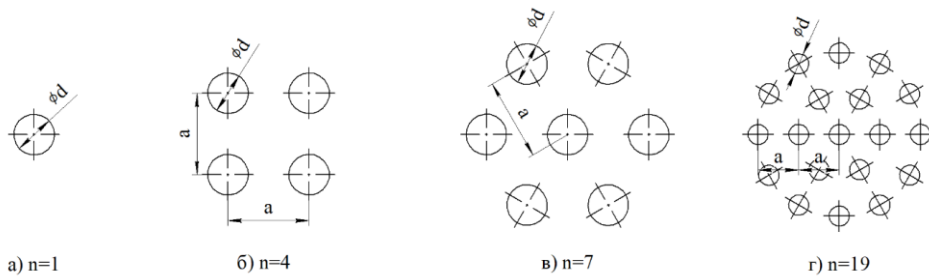


Рис. 3. Структурные схемы расположения ударников

В качестве привода для устройства упрочнения возможны следующие варианты:

- электрический;
- механический;
- пневматический;
- гидравлический.

Вне зависимости от применяемого привода возможны также различные варианты компоновок, учитывающие особенности обрабатываемых деталей и упрочняемых зон, например:

- вертикальная (рис. 4, а);
- горизонтальная (рис. 4, б);
- портативная (рис. 4, в).

При выборе метода формирования технологических воздействий ключевым граничным условием будет являться характеристика упрочняемых зон.

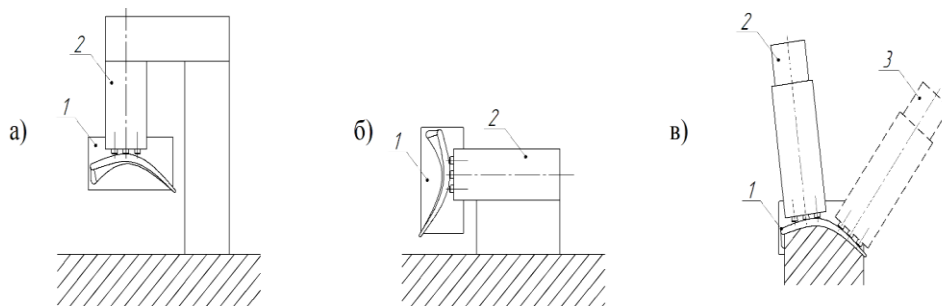


Рис. 4. Возможные варианты компоновок устройства для ударного упрочнения:

- а – вертикальная компоновка; б – горизонтальная компоновка; в – портативная компоновка;
- 1 – обрабатываемая деталь; 2 – устройство упрочнения;
- 3 – гипотетическое положение устройства упрочнения

Для локального упрочнения рассматриваемой лопатки, а именно входной кромки, спроектировано портативное устройство ударного упрочнения с электромеханическим приводом, которое включает 7 ударников с величиной хода 2 мм, с возможностью изменения частоты воздействий в широком диапазоне за счет регулирования частоты вращения электропривода. Общий вид устройства, которое можно описать структурной формулой (2) представлен на рис. 5.

$$W \rightarrow A_1 - B_2 - C_3 - D_2 - E_3 - F_5. \quad (2)$$



Рис. 5. Общий вид рассматриваемого устройства упрочнения

В данной работе рассмотрен процесс синтеза ФОТО на примере создания устройства ударного упрочнения для зонального упрочнения входной кромки лопатки ГТД. При этом применение рассматриваемой методики синтеза ФОТО не ограничивается лопатками ГТД, а может применяться к любым деталям сложного профиля, упрочнение которых существующими методами затруднительно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кротинов Н.Б. Поверхностное пластическое упрочнение лопаток газотурбинных двигателей // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. 2014. Т. 3. № 1 (76). С. 68–71. EDN TGNFKL.
2. Федорченко Д.Г., Новиков Д.К. Технологические методы повышения надежности деталей ГТД // Вестник Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2015. Т. 19. № 1 (67). С. 62–66. EDN TPNUGV.
3. Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С. Структурный анализ разрушений лопаток турбины ГТД и причин их возникновения // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли: сб. науч. статей 14-й междунар. науч.-техн. конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей, Брянск, 05–07 октября 2022 г. Брянск: Брянск. гос. техн. ун-т, 2022. С. 16–20. EDN TWDHCW.
4. Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С. Анализ влияния деструктивных факторов на выход из строя лопаток турбины ГТД и локализация зон их действия // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: матер. Шестой международной научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 9–10 ноября 2023 г. Петропавловск-Камчатский: Камчат. гос. техн. ун-т, 2023.
5. Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С. Основы синтеза механизма повышения ресурса лопаток турбины газотурбинного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2022. № 4 (79). С. 35–43.

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА ФОРМЫ НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРТИЗИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОЛИУРЕТАНА

Мосур В.Г.^{1,2}✉, доцент, к.т.н., 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: vladlen.mosur@klgtu.ru

Представлены результаты сравнительного анализа степени влияния фактора формы амортизирующих элементов из полиуретана на величину относительной деформации при циклическом сжатии. Показано, что наибольшей демпфирующей способностью при одинаковых габаритных размерах обладают амортизирующие элементы в форме куба.

Ключевые слова: относительная деформация, форма элемента, полиуретан

INFLUENCE OF THE SHAPE FACTOR ON THE DAMPING CHARACTERISTICS OF SHOCK ABSORBING ELEMENTS MADE FROM POLYURETHANE

Mosur V.G.^{1,2}✉, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,

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: vladlen.mosur@klgtu.ru

The results of a comparative analysis of the degree of influence of the shape factor of shock-absorbing elements made of polyurethane on the value of relative deformation during cyclic compression are presented. It has been shown that cube-shaped shock-absorbing elements have the greatest damping capacity, with the same overall dimensions.

Keywords: relative deformation, element shape, polyurethane

Уменьшение динамических нагрузок при работе станков и технологического оборудования – актуальная проблема современного машиностроения.

Для снижения вибрационных и ударных нагрузок наиболее часто используют конструктивные решения, обеспечивающие диссипацию и рассеивание энергии динамически действующих нагрузок – амортизирующие устройства с неметаллическими упругими элементами.

В современном машиностроении широкое применение находят амортизирующие элементы из полиуретана [1], обладающие рядом важных преимуществ. При сравнительно простой конструкции и дешевизне изготовления их нагрузочная способность больше, чем резиновых с аналогичными геометрическими параметрами. Они могут эксплуатироваться при более широком диапазоне температур – от -40 до +120 °С.

Демпфирующая способность амортизирующих элементов из полиуретана зависит от целого ряда параметров, среди которых следует выделить геометрическую форму элемента.

Амортизирующие элементы [2] могут иметь различные формы, среди которых наиболее простыми и удобными для производства и эксплуатации являются параллелепипед (куб), сплошной цилиндр и цилиндр с отверстием.

В процессе эксплуатации амортизирующие элементы могут подвергаться различным видам деформации – сжатию, изгибу, кручению, сдвигу. Достаточно часто амортизирующие элементы работают в условиях циклического сжатия.

Влияние формы амортизаторов из полиуретана определяется тем, что при постоянной толщине и площади поперечного сечения элемента, изменяя форму, можно получить

различные характеристики упругости. Такое влияние оценивается фактором формы, который представляет собой отношение площади опорной поверхности S_o к площади боковой поверхности S_b элемента: $\Phi = S_o / S_b$.

Фактор формы для амортизирующих элементов из полиуретана в виде куба, сплошного цилиндра и цилиндра с отверстием можно определить соответственно по формулам [1]:

$$\Phi_1 = \frac{l^2}{4hl}; \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \frac{D}{4h}; \quad (2)$$

$$\Phi_3 = \frac{D-d}{4h}, \quad (3)$$

где l – размеры сторон опорной поверхности элемента; h – высота элемента; D – наружный диаметр элемента; d – внутренний диаметр (отверстие) элемента.

Основой расчета элементов из полиуретана при сжатии можно принять зависимость между сжимающей силой и величиной сжатия элемента [1]:

$$F_c = 1,5 K_\Phi E_{CT} \frac{S_o \Delta h}{h}, \quad (4)$$

где F_c – сила сжатия; K_Φ – коэффициент изменения жесткости элемента; Δh – деформация при сжатии элемента; E_{CT} – статический модуль упругости при сжатии.

Следует отметить, что для эластомеров отношение динамического модуля упругости к статическому может меняться в диапазоне от 1,18 до 2,0 и более [1] в зависимости от твердости материала. Поэтому в формулу (4) для предварительных расчетов следует добавить среднее значение этого отношения, равное 1,5.

$$\text{Относительная деформация элемента определяется как } \varepsilon = \Delta h / h. \quad (5)$$

Совместно решая выражения (4) и (5), получим формулу для проверочного расчета амортизирующего элемента:

$$\varepsilon = \frac{F_c}{1,5 K_\Phi E_{CT} S_o} \leq [\varepsilon]. \quad (6)$$

Величину допускаемой относительной деформации можно принять: $[\varepsilon] = 0,15$ – при постоянно действующих динамических нагрузках; $[\varepsilon] = 0,15-0,20$ – при кратковременно действующих динамических нагрузках.

Коэффициент изменения жесткости амортизирующего элемента в виде куба, сплошного цилиндра и цилиндра с отверстием можно определить соответственно по формулам [3, 4]:

$$K_\Phi = 1 + 0,16(\Phi_1)^{1,04}; \quad (7)$$

$$K_\Phi = 1 + 0,23(\Phi_2)^{1,13}; \quad (8)$$

$$K_\Phi = 0,73 + 0,46(2\Phi_3)^2. \quad (9)$$

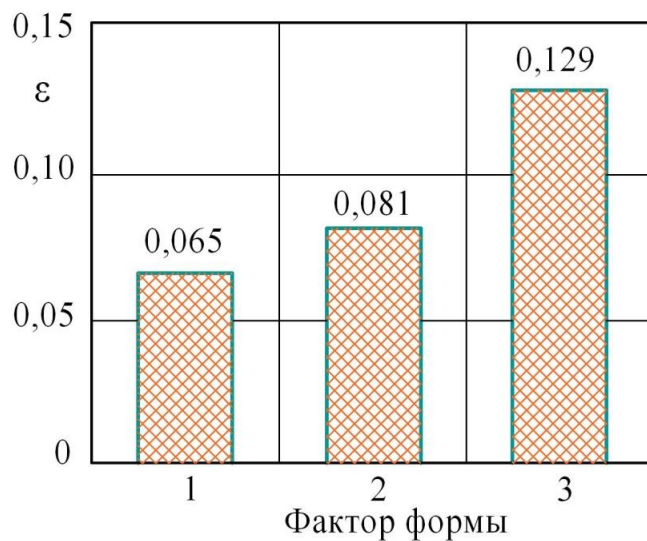
Выполним сравнительный анализ демпфирующей способности амортизирующих элементов из полиуретана различной формы при одинаковых геометрических параметрах для двух случаев.

Первым является случай, когда геометрические размеры элемента конструктивно ограничены. Тогда в качестве постоянного (базового) геометрического параметра выберем линейный размер элемента. Как исходный выберем элемент в форме куба. Примем длину основания куба $l = 30$ мм, тогда диаметр основания цилиндра, вписанного в основание куба, составит $D = 30$ мм. Диаметр отверстия в цилиндре примем $d = (1/3)D$, т. е. $d = 10$ мм.

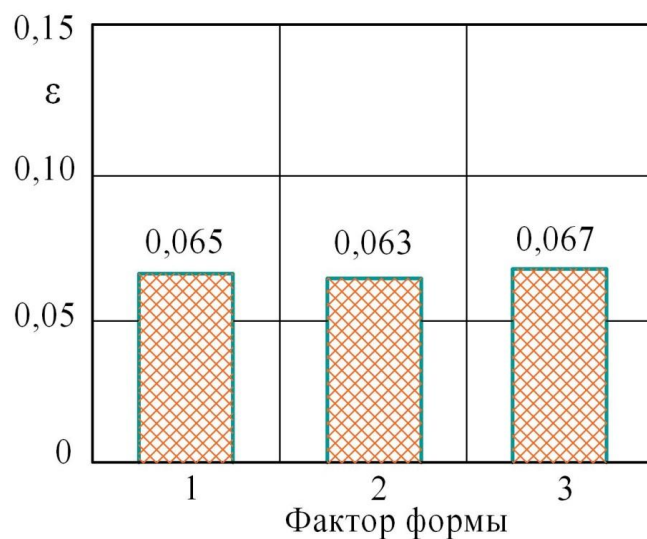
Во втором случае в качестве постоянного геометрического параметра выберем площадь опорной поверхности $S_o = 900$ мм². При длине основания куба $l = 30$ мм будем иметь для сплошного цилиндра $D = 33,85$ мм, цилиндра с отверстием $D = 35,3$ мм и $d = 10$ мм.

Примем одинаковыми высоту всех элементов $h = 15$ мм, силу сжатия $F_c = 2000$ Н, статический модуль упругости [4] $E_{CT} = 21$ МПа.

На рисунке (а, б) показано изменение относительной деформации в зависимости от фактора формы.



а



б

Влияние фактора формы на относительную деформацию:

1 – Φ_1 ; 2 – Φ_2 ; 3 – Φ_3 ; а – постоянный линейный размер; б – постоянная опорная площадь

Как видно из полученных результатов, при одинаковых линейных размерах лучшей демпфирующей способностью обладает амортизирующий элемент в форме куба. Величина относительной деформации элементов в виде сплошного цилиндра и цилиндра с отверстием больше соответственно в 1,24 и 1,98.

При одинаковой площади опорной поверхности величина относительной деформации примерно сопоставима (изменяется в диапазоне от 0,063 до 0,067) для различных форм амортизирующих элементов. Наименьшая величина деформации наблюдается при форме в виде сплошного цилиндра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Потураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. М.: Машиностроение, 1977. 216 с.
2. Яковлев С.Н. Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана. СПб.: Реноме, 2013. 173 с.
3. Черныш А.А., Яковлев С.Н. Экспериментальное исследование деформативности полиуретановых эластомеров, применяемых в судовых амортизаторах // Вестник Гос. ун-та морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 3. С. 534–542. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-534-542.
4. Бадретдинов Т.В., Ямалиев В.У., Булюкова Ф.З. Методика проектирования, изготовления и испытания упругого полиуретанового узла бурового демпфера // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17. № 6. С. 102–110. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-6-102-110.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT14 ПО ТЕМПЕРАТУРЕ ПОЛИМОРФНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Полтавец В.В.¹ ✉, д.т.н., доцент, Шаповалова Н.Н.², инженер

¹ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация

² ООО «Энергосбыт Донецк», г. Донецк, Российская Федерация

E-mail: poltavetsvv@gmail.com

Описана методика определения допустимого значения усилия поджима обрабатываемой заготовки из титанового сплава VT14 к рабочей поверхности алмазного шлифовального круга при шлифовании с фиксированной силой поджима заготовки к шлифовальному кругу. Рассчитаны значения составляющих сил резания, ограниченных условием отсутствия полиморфных превращений в поверхностном слое заготовки, при плоском врезном шлифовании кругами 1A1 250×76×15×5 из алмазов AC6 на металлической связке M2-01 различной зернистости.

Ключевые слова: алмазное шлифование, фиксированный режим обработки, титановый сплав, сила поджима заготовки

DETERMINATION OF THE LIMITING VALUE OF THE RADIAL COMPONENT OF THE CUTTING FORCE WHEN GRINDING TITANIUM ALLOY VT14 BY TEMPERATURE OF POLYMORPHIC TRANSFORMATION

Poltavets V.V.¹ ✉, Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Shapovalova N.N.², engineer

¹ Donetsk national technical university, Donetsk, Russian Federation

² Limited Liability Company «Energosbyt Donetsk», Donetsk, Russian Federation

E-mail: poltavetsvv@gmail.com

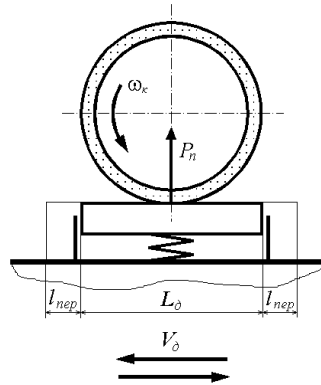
The method of determining the allowable value of hold-down pressure force of the workpiece made of titanium alloy VT14 to the working surface of a diamond grinding wheel when grinding with fixed hold-down pressure of workpiece to the grinding wheel is described. The values of the cutting force components, limited by the condition of the absence of polymorphic transformations in the surface layer of the workpiece, are calculated for flat infeed grinding with wheels 1A1 250×76×15×5 of AC6 diamonds with metallic binder M2-01 of different grain sizes.

Keywords: diamond grinding, fixed machining condition, titanium alloy, hold-down pressure force of workpiece

Одним из методов выявления потенциально возможных высоких режущих свойств абразивно-алмазного шлифовального инструмента является использование в технологической подготовке производства способа шлифования с заданной радиальной силой поджима шлифовального круга к обрабатываемому изделию («шлифование по упругой схеме»). Применение шлифования по упругой схеме «позволяет снизить силовую и тепловую напряженность процесса, повысить точность и качество поверхностного слоя» заготовки [1]. Практическая ценность этого способа состоит в возможности преобразовании нестационарного процесса шлифования (нестационарность является следствием того, что режущая способность шлифовального круга непрерывно и с различной интенсивностью изменяется в процессе обработки) в квазистационарный.

При обработке по упругой схеме (см. рисунок) условия реализации процесса шлифования определяются как известными режимами резания, так и силой поджима рабочей поверхности круга (РПК) к заготовке P_n , которая уравнивается радиальной составляющей силы резания P_r . Так как с помощью соответствующих нагрузочных устройств обеспечива-

ется постоянство величины сил $P_n = P_y$ на протяжении всего времени обработки, изменение параметров РПК в процессе шлифования приводит к уменьшению глубины шлифования t и, соответственно, к уменьшению производительности обработки при сохранении стабильных значений показателей качества обработанной поверхности.



Плоское врезное шлифование с фиксированной силой поджима шлифовального круга к изделию

В дальнейшем вместо термина «шлифование по упругой схеме» будем использовать термин «шлифование с фиксированной силой поджима заготовки к шлифовальному кругу», так как кроме шлифования с постоянной нормальной силой известно также шлифование по упругой схеме, когда в процессе обработки постоянной поддерживается тангенциальная составляющая силы резания [2].

Исследования производительности алмазного шлифования титановых сплавов нами проводились при обработке деформируемого титанового сплава ВТ14, который относится к сплавам средней прочности (предел прочности в отожженном состоянии до 981 МПа) и является двухфазным сплавом со структурой $(\alpha + \beta)$ [3]. Ограничением для силовых факторов при шлифовании таких сплавов является достижение температуры полиморфного превращения в поверхностном слое обработанной поверхности заготовки.

Для определения усилия поджима заготовки к РПК, ограниченного температурой полиморфного превращения, используются следующие группы исходных данных:

1) параметры рабочей поверхности круга: средневзвешенный кубический диаметр шаровой модели зерна $d_{\text{ш}}$, мм; угол при вершине режущего выступа зерна ε , град; радиус округления режущей кромки зерна ρ , мм; параметры распределения разновысотности вершин зерен по закону Вейбулла $F(t_{\text{ф}})$;

2) режимы обработки: скорость круга $V_{\text{к}}$, м/с; скорость детали $V_{\text{д}}$, м/мин; фактическая глубина шлифования $t_{\text{ф}}$, мм;

3) геометрические размеры шлифовального круга: радиус $R_{\text{к}}$, мм; высота $H_{\text{к}}$, мм;

4) физико-механические свойства обрабатываемого материала: коэффициент трения алмазного зерна на обрабатываемом материале μ , средний коэффициент продольной усадки стружки K_1 , коэффициент шлифования $K_{\text{ш}}$, уравнение регрессии, описывающее изменение касательных напряжений сдвига в условной плоскости сдвига при обработке материала шлифованием;

5) теплофизические свойства обрабатываемого материала: коэффициент температуропроводности a , $\text{м}^2/\text{с}$, коэффициент теплопроводности λ , $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$, температура полиморфного превращения T_{max} , К.

При расчете силы поджима заготовки приняты следующие допущения:

1) влияние режимов обработки на силы резания при шлифовании с фиксированными режимами и шлифовании с фиксированной радиальной силой поджима заготовки к шлифовальному кругу идентично, если их кинематика одинакова;

2) процесс теплообмена в зоне резания стационарный.

Рассмотрим методику определения предельного допустимого значения силы поджима заготовки к шлифовальному кругу P_n , основанную на использовании указанных групп исходных данных и на учете приведенных допущений.

Из работы В.А. Сипайлова [4] известно, что максимальная температура поверхности резания связана со значением тангенциальной составляющей силы резания P_z соотношением

$$T = \frac{4a \cdot 60V_{\kappa} \sqrt{H} \cdot P_z}{\lambda V_{\phi} S \sqrt{\pi}}, \quad (1)$$

где H – безразмерная полуширина источника тепла; S – площадь зоны контакта детали со шлифовальным кругом.

Радиальная составляющая силы P_y может быть выражена через тангенциальную с помощью коэффициента шлифования $K_{ш}$:

$$P_z = P_y \cdot K_{ш}. \quad (2)$$

Нами в работе [5] были предложены формулы для определения составляющих силы резания при шлифовании, выведенные для произвольной формы зоны контакта задней поверхности зерна с заготовкой. Эти формулы имеют вид

$$P_z = \frac{\left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \cos \omega}}{\sin \beta} + K_{\zeta} M f_{\zeta} \mu \right) z_{\delta} C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \cos \omega}}{\sin \beta} + K_{\zeta} M f_{\zeta} \mu \right) z_{\delta} \alpha \frac{4a \cdot 60V_{\epsilon} \sqrt{H} \alpha_{\hat{a}}}{\lambda V_{\hat{a}} S \sqrt{\pi}}}; \quad (3)$$

$$P_y = \left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_{\zeta} M f_{\zeta} \right) z_{\delta} \left(C - \alpha \frac{4a \cdot 60V_{\epsilon} \sqrt{H} \alpha_{\hat{a}}}{\lambda V_{\hat{a}} S \sqrt{\pi}} P_z \right), \quad (4)$$

где $M = 1 + 2(\pi/4 - \beta)$ – коэффициент, определяемый соотношением нормального и касательного напряжений σ/τ_s ; a_z – максимальная толщина среза; β , ω – соответственно угол сдвига и угол действия; K_{ζ} – коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на поверхности контакта зерна с заготовкой; μ – коэффициент трения задней поверхности зерна о поверхность резания; l_3 – длина площадки контакта зерна, мм; z_p – количество одновременно контактирующих с заготовкой зерен; b – ширина единичного среза, мм; f_3 – площадь зоны контакта задней поверхности зерна с заготовкой (в принятой нами модели алмазного зерна с прямоугольной площадкой контакта $f_3 = b \cdot l_3$); C , α – начальная ордината и коэффициент в линейной регрессионной зависимости, отражающей влияние температурно-скоростных факторов в условиях шлифования на величину касательных напряжений сдвига в обрабатываемом материале (зависимость имеет вид $\tau_s = C - \alpha T$).

Подставив формулу (3) в (4), а затем в (1) с учетом (2), получим зависимость для определения температуры на обработанной поверхности, которая имеет следующий вид:

$$T = \frac{\left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_{\zeta} M f_{\zeta} \right) z_{\delta} C \frac{4a \cdot 60V_{\epsilon} \sqrt{H} \alpha_{\hat{a}} K_{\phi}}{\lambda V_{\hat{a}} \sqrt{\pi}}}{1 + \left(\frac{\sqrt{1 + M^2 a_z b \sin \omega}}{\sin \beta} + K_{\zeta} M f_{\zeta} \right) z_{\delta} \alpha \frac{4a \cdot 60V_{\epsilon} \sqrt{H} \alpha_{\hat{a}} K_{\phi}}{\lambda V_{\hat{a}} S \sqrt{\pi}}}. \quad (5)$$

Так как при упругой схеме обработки фактическая глубина шлифования является переменной величиной, критическое значение температуры T_{max} , выше которого произойдут полиморфные превращения в поверхностном слое обрабатываемого титанового сплава, будет достигнуто при определенном значении фактической глубины шлифования t_{ϕ} . Для этого конкретного значения глубины шлифования нам необходимо рассчитать значение радиальной составляющей силы резания, которое и будет определять предельное значение важнейшего параметра обработки $P_{п}$, т. е. фиксированной радиальной силы поджима заготовки к шлифовальному кругу [6].

Аналитически уравнение (5) относительно фактической глубины шлифования решить невозможно, так как оно является трансцендентным, а величина t_{ϕ} входит в данное уравнение в неявном виде. Поэтому для решения уравнения (5) относительно фактической глубины шлифования по заданной критической температуре T_{max} представим условие, обеспечивающее отсутствие полиморфных превращений в материале поверхностного слоя заготовки при шлифовании, в виде неравенства

$$0,99T_{max} < T < 1,00T_{max}. \quad (6)$$

При расчете силы поджима заготовки к РПК при шлифовании с фиксированной силой поджима неравенство (6) на основе использования зависимости (5) решается численными методами с применением ЭВМ относительно глубины шлифования t_{ϕ} . Для расчета используются параметры РПК, сформированные во время правки шлифовального круга. Найденное значение t_{ϕ} является максимально возможной исходной глубиной шлифования t_0 , обеспечивающей отсутствие дефектов в виде изменения фазовой структуры титанового сплава на поверхности заготовки в начале обработки.

Используя исходное значение глубины t_0 , можно рассчитать допустимое значение радиальной составляющей силы резания $[P_y]$ по формуле, полученной подстановкой в (4) выражений (1) и (2). Эта формула приобретет вид

$$[P_y] = \frac{\left(\frac{\sqrt{1+M^2 a_z \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M l_3 \right) z_p b C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1+M^2 a_z \sin \omega}}{\sin \beta} + K_3 M l_3 \right) z_p b \alpha \frac{4a \cdot 60V_k \sqrt{H} \alpha_b}{\lambda V_d \sqrt{\pi}} K_{ш}}. \quad (7)$$

Значение радиальной силы $[P_y]$ должно поддерживаться постоянным посредством упругого поджима заготовки к РПК с силой $P_{п} = [P_y]$ на протяжении всего времени обработки, гарантируя тем самым отсутствие полиморфных превращений.

Результаты расчета значений составляющих сил резания, ограниченных условием отсутствия полиморфных превращений в поверхностном слое заготовки из титанового сплава ВТ14, при плоском врезном шлифовании кругами 1А1 250×76×15×5 из алмазов АС6 на металлической связке М2-01 различной зернистости приведены в таблице.

Как видно из таблицы, при шлифовании титанового сплава ВТ14 допустимой силой поджима заготовки к РПК является сила, определенная по температуре полиморфных превращений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки, если температура основного объема материала заготовки существенно не изменилась по сравнению с исходным состоянием заготовки (коэффициент теплопроводности сплава ВТ14 принимается при 20 °С). Использование таких значений допустимой силы поджима заготовки гарантированно предотвращает достижение температуры полиморфных превращений при любых изменениях теплофизических условий протекания процесса обработки, основываясь на линейном характере изменения теплопроводности титановых сплавов.

Допустимые значения тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания

Наименование технического ограничения	Зернистость шлифовального круга					
	100/80		160/125		200/160	
	P_z , Н	P_y , Н	P_z , Н	P_y , Н	P_z , Н	P_y , Н
Температура полиморфного превращения в поверхностном слое обрабатываемой заготовки (теплопроводность при 20 °С)	20,7	38,0	21,5	35,9	20,8	31,8
Температура полиморфного превращения в поверхностном слое обрабатываемой заготовки (теплопроводность при 700 °С)	40,6	75,1	44,0	74,2	44,3	67,7

При этом, как показывают результаты расчетов, значение допустимой силы поджима уменьшается с увеличением зернистости шлифовального круга. По нашему мнению, это объясняется существенным снижением количества одновременно контактирующих с заготовкой зерен для более крупнозернистых кругов.

Соответственно, одним из обобщенных режимов плоского врезного шлифования заготовок из титанового сплава ВТ14 с фиксированной силой поджима заготовки к РПК с учетом неизбежных погрешностей нагрузочных устройств будут следующие значения силы: для круга зернистостью 100/80 – $P_{п} = 38,0$ Н, зернистостью 160/125 – $P_{п} = 36,0$ Н, зернистостью 200/160 – $P_{п} = 32,0$ Н. Указанный обобщенный режим является важнейшей исходной величиной при оптимизации процесса алмазного шлифования в частности и абразивно-алмазной обработки в перспективе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб, М.Д. Узунян, М.С. Пивоваров. К.: Техника, 1978. 192 с.
2. Иванов Н.П., Пыжов И.Н., Воронков В.И. Методика оценки работоспособности кругов из СТМ // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. Харьков: Изд-во «Основа». 1989. Вып. 42. С. 19–22.
3. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 362 с.
4. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
5. Полтавец В.В. Обоснование режимов шлифования труднообрабатываемых материалов при электроэрозионном воздействии на рабочую поверхность круга: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / ДонНТУ. Донецк, 2001. 19 с.
6. Полтавец В.В. Развитие экспериментально-теоретического метода оптимизации режимов шлифования путем использования обобщенного показателя процесса // Научные труды ДонНТУ. Серия: Машиностроение и машиноведение. Донецк: ДонНТУ, 2011. Вып. 8 (190). С. 65–71.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА СО СМЕННЫМИ МНОГОГРАННЫМИ ПЛАСТИНАМИ НА ТОКАРНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Трофименко Н.Г., аспирант

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

Предлагается комплексный подход к оценке работоспособности инструментальных систем, применяемых при механической обработке металла. Роль инструмента в процессе резания определяется как центральная. Понятия износа и стойкости взаимосвязаны неразрывно и понимаются как основополагающие технологические характеристики инструмента. Проводится диагностическое исследование поведения инструментальной системы, применяемой при работе на токарном станке в производственных условиях. В связи с наблюдением автоколебаний в системе принято рассматривать нагрузку, прилагаемую к сменной многогранной пластине, как циклическую и вести расчет стойкости инструмента.

Ключевые слова: процесс резания, инструментальная система, износ, стойкость, автоколебания

THE STUDY OF DURABILITY OF TOOL WITH REPLACEABLE MULTIFACETED PLATES ON TURNING OPERATIONS

Trofimenko N.G., PhD student

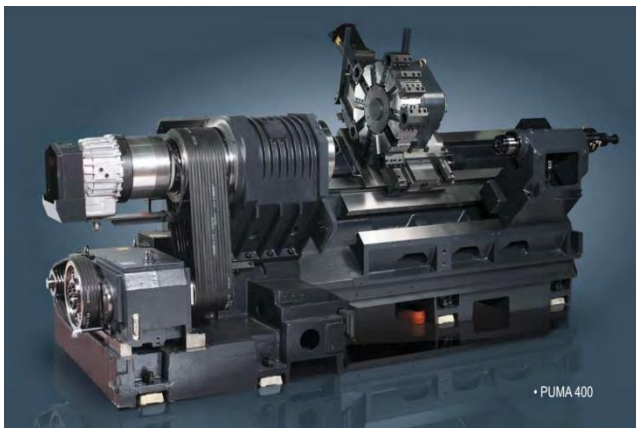
*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: trofimenko-n@inbox.ru*

An integrated approach to assessing the performance of tool systems used in metal machining is proposed. The role of the tool in the cutting process is defined as central. The concepts of wear and durability are inextricably interrelated and are understood as the fundamental technological characteristics of a tool. A diagnostic study of the behavior of the tool system used when working on a lathe in a production environment is carried out. In connection with the observation of self-oscillations in the system, it is customary to consider the load applied to the replaceable multifaceted plate as cyclic and to calculate the tool life.

Keywords: cutting process, tool system, wear, durability, self-oscillation

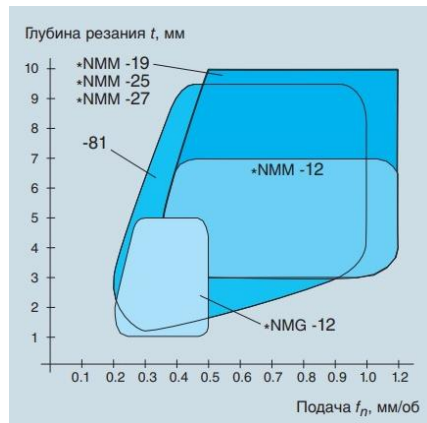
С точки зрения практики промышленного применения процесса токарной обработки при изготовлении деталей на станках с ЧПУ рационально применить научные подходы, которые включают учет неконтролируемых воздействий (случайные факторы) и управляемые характеристики, к которым относятся: геометрия инструмента, схема резания, режимы обработки. Применительно к областям технологии механической обработки такой подход позволяет определять производительность процесса, качество поверхности, а также стойкость инструмента. Стойкость инструмента оказывает большое влияние на качество и производительность процесса механической обработки, так как в результате износа рабочих поверхностей инструмента изменяются условия взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью (сила и температура резания) [1].

В работе проведены экспериментальные исследования на станке с ЧПУ Doosan PUMA 400 (рис. 1) по определению влияния режимов резания на стойкость твердосплавного инструмента с СМП фирмы Sandvik Coromant CNMG – 12 по обработке материала – Сталь 45. Выбор режимов резания производился в соответствии с рекомендациями фирмы Sandvik Coromant (рис. 2). Исходя из данных, полученных на основании производственного опыта, определена стойкость пластин при черновых ($S_0 = 1,0$ мм/об), получистовых ($S_0 = 0,5$ мм/об) и чистовых ($S_0 = 0,2$ мм/об) операциях точения (рис. 3).



а

Рис. 1. Токарный станок с ЧПУ Doosan PUMA 400



б

Рис. 2. Предпочтительные режимы резания при точении на станках с ЧПУ инструментом с СМП фирмы Sandvik Coromant CNMG – 12

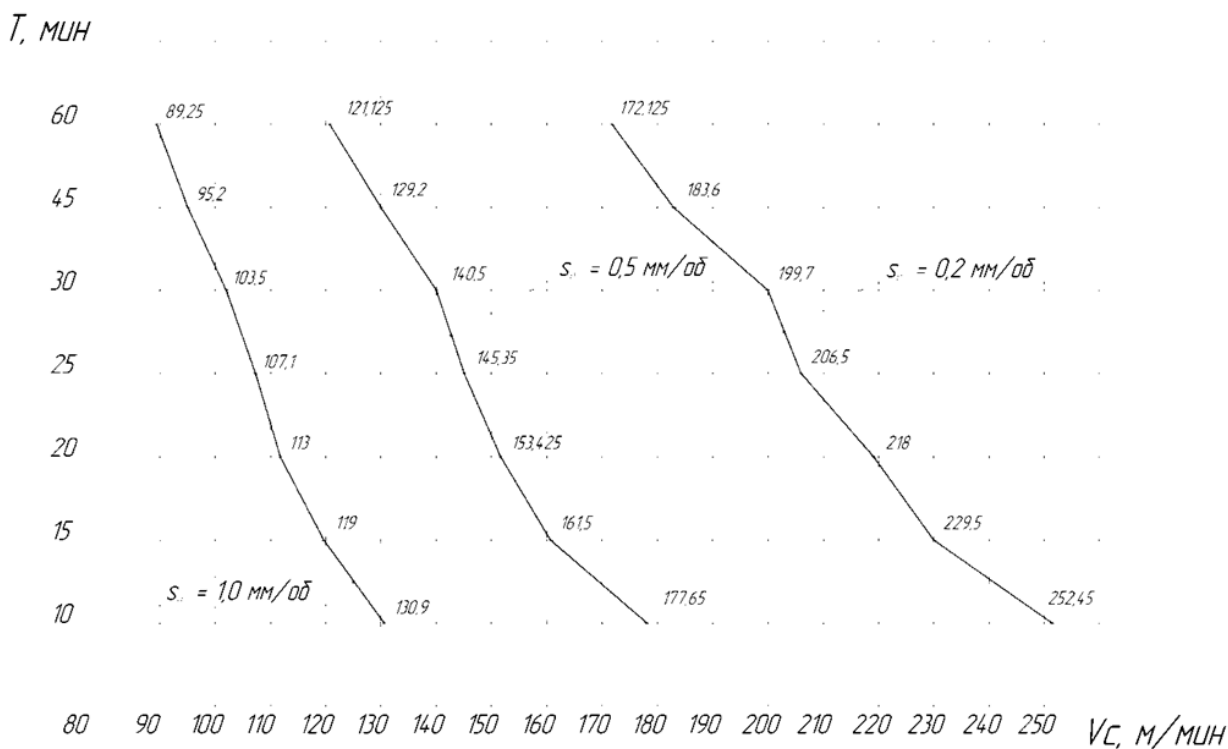


Рис. 3. Зависимость стойкости инструмента CNMG-12 от скорости резания Стали 45

Установлено, что с увеличением скорости резания стойкость инструмента уменьшается. Определены области скоростей резания для различных методов обработки: черновая обработка ($t = 1,0-3,0$ мм) от 90 до 130 м/мин, получистовая обработка ($t = 0,5-1,0$ мм) от 130 до 180 м/мин, чистовая обработка ($t = 0,2-0,5$ мм) от 180 до 250 м/мин.

Исследования стойкости инструментов показали, что износ инструмента зависит от автоколебаний, возникающих при обработке [2, 3]. Автоколебания системы определялись с помощью встроенных средств диагностики состояния приводов станка. Посредством программы управления производством dra, внедренной на станках предприятия, определялись амплитуда и частота колебания силы резания (рис. 4).

Нагрузка на приводы подачи станка отражаются в виде диаграмм программы и дают представление о динамике процесса резания. Колебания нагрузки приводов, их частоты

и амплитуды меняются в зависимости от режимов обработки и оказывают влияние на стойкость СМП. Нагрузку, приложенную к режущему инструменту, можно принять как циклическую.

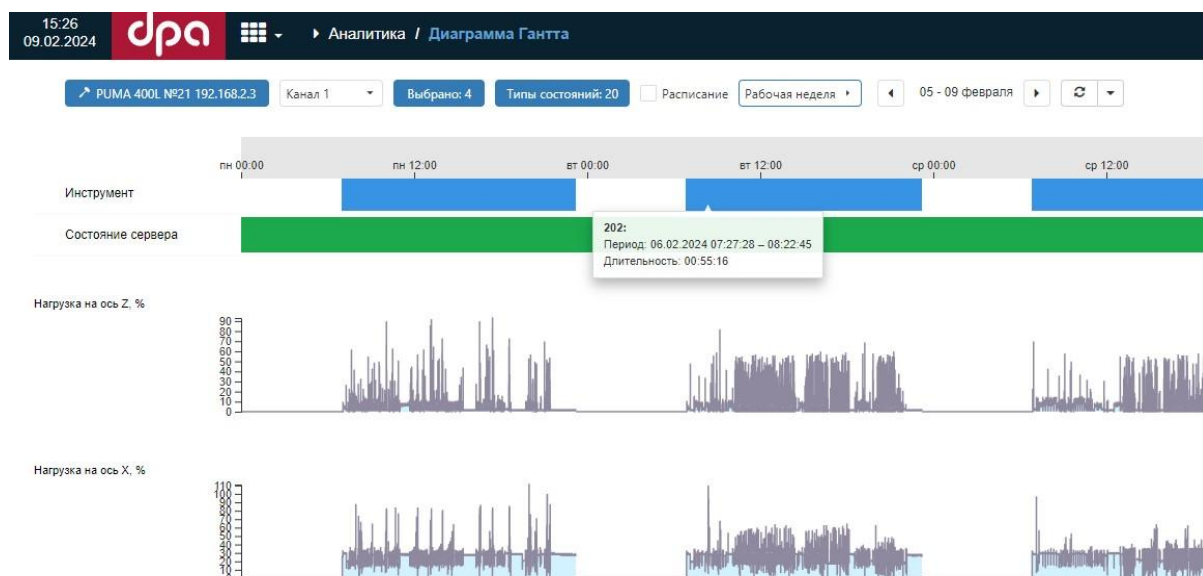


Рис. 4. Фрагмент вида интерфейса системы учета колебания силы резания при черновой обработке по осям X и Y

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мыльников В.В., Кондрашкин О.Б., Шетулов Д.И. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография. Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. 177 с.
2. ГОСТ 27034-86. Сплавы твердые спеченные Метод определения предела прочности и предела текучести при сжатии.
3. Holmberg Kenneth. Coatings tribology: contact mechanisms, deposition techniques and application. 2nd ed. (Tribology and interface engineering series; v. 56). 2009.

Секция 4. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ **В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 536.46

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ КОМПОЗИЦИИ AlN-TiC МЕТОДОМ АЗИДНОГО СВС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕЛАНИНА В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА УГЛЕРОДА

Андрияшкин Д.В., магистрант, **Майдан Д.А.**, доцент, к.т.н., доцент

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

В данной работе был произведен термодинамический анализ горения систем типа $Al_x+Ti_x+NaN_3+C_3H_6N_6+NH_4F$ в специализированной программе Thermo. На основании полученных данных были составлены графики зависимости расчетной температуры реакции и энтальпии образования от количества Al в исходных компонентах. В результате был сделан вывод о возможности получения искомой высокодисперсной керамической композиции AlN-TiC методом азидного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Ключевые слова: нитрид алюминия, карбид титана, термодинамический анализ, керамическая композиция, синтез

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF OBTAINING A HIGHLY DISPERSED AlN-TiC CERAMIC COMPOSITION BY AZIDE SHS METHOD USING MELANIN AS A CARBON SOURCE

Andriyashkin D.V., Master's Degree student,

Maidan D.A., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

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

In this work a thermodynamic analysis of combustion of $Al_x+Ti_x+NaN_3+C_3H_6N_6+NH_4F$ type systems was performed in the specialized program «Thermo». Based on the obtained data, graphs of dependence of the calculated reaction temperature and enthalpy on the number of moles of Al in the initial components were drawn up. As a result, it was concluded that it is possible to obtain the desired highly dispersed ceramic composition AlN-TiC by the azide SHS method.

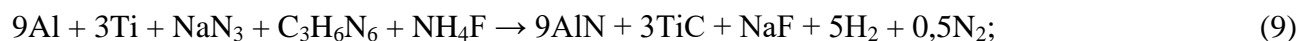
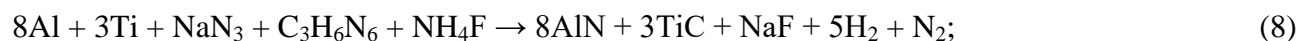
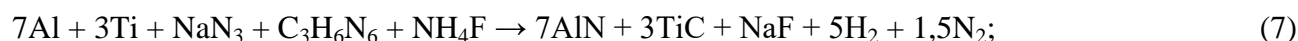
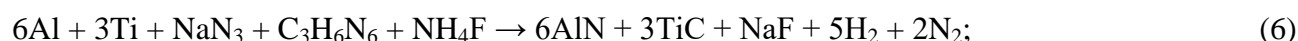
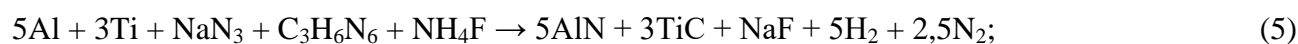
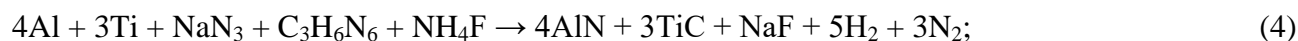
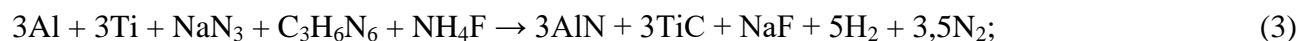
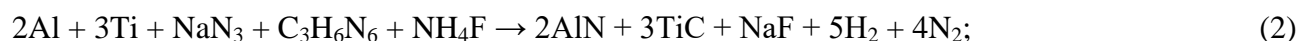
Keywords: aluminum nitride, titanium carbide, thermodynamic analysis, ceramic composition, synthesis

Нитрид алюминия характеризуется такими свойствами, как высокая температура плавления, высокая удельная теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения, низкая диэлектрическая проницаемость. Сочетание диэлектрических свойств и высокой удельной теплопроводности нитрида алюминия позволяет использовать его в качестве теплоотводящего и электроизоляционного материала в различных устройствах электротехники и электроники [1–3]. Материалы на основе карбида титана обладают коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения, термической и химической стабильностью, высокой температурой плавления (3260 °С) и высокой твердостью (30 ГПа). Благодаря таким свойствам карбид титана можно использовать в обработке материалов и режущих инструментов. Однако чистый карбид титана обладает низкой вязкостью разрушения и низкой термостойкостью, что ограничивает его применение [4–5].

Композиция на основе нитрида алюминия и карбида титана имеет комплекс свойств, которые позволяют применять ее в более широкой области промышленности, что делает ее

более перспективной. Однако ввиду больших энергетических и технологических затрат традиционных способов получения композиционных материалов было принято решение рассмотреть технологию азидного СВС. Технология СВС характеризуется отсутствием затрат на электроэнергию для нагрева высоких температур (используется тепло, выделяемое реакцией горения). Используется простое и малогабаритное оборудование, реализуются большие скорости процесса, конечный продукт отличается высокой чистотой и экологической безопасностью (из-за высоких температур вредные примеси разлагаются и испаряются) [6–7].

Для получения высокодисперсной керамической композиции «нитрид алюминия – карбид титана» по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с использованием меланина ($C_3H_6N_6$) в качестве источника углерода предлагается система уравнений, в которой увеличивается количество алюминия в исходных компонентах реакции и тем самым изменяется соотношение между нитридом алюминия и карбидом титана в продуктах реакции:



По относительной атомной массе и количеству молей каждого исходного компонента рассчитаем их массу для синтеза (табл. 1). Масса исходных компонентов рассчитывалась для образца диаметром 30 мм и высотой 45 мм.

Термодинамический анализ проводился с использованием программы Thermo. Расчет выполнялся при давлении внешнего азота 4 МПа двумя способами.

Первый расчет выполнялся при условии, что в результате реакции образуются только нитрид алюминия, карбид титана, фторид натрия и газы, то есть строго в соответствии с формулами (1)–(10). Результаты термодинамических расчетов представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 1

Масса исходных компонентов для синтеза керамической композиции «нитрид алюминия – карбид титана»

Номер реакции	Масса исходных компонентов, г					Теоретический выход твердых продуктов реакции, г		
	Al	Ti	NaN ₃	C ₃ H ₆ N ₆	NH ₄ F	AlN	TiC	NaF
1	1,51	8,02	3,63	7,04	2,07	2,29	10,03	2,34
2	2,87	7,63	3,45	6,70	1,97	4,35	9,54	2,23
3	4,10	7,27	3,29	6,38	1,87	6,22	9,09	2,13
4	5,22	6,94	3,14	6,10	1,79	7,93	8,69	2,03

Номер реакции	Масса исходных компонентов, г					Теоретический выход твердых продуктов реакции, г		
	Al	Ti	NaN ₃	C ₃ H ₆ N ₆	NH ₄ F	AlN	TiC	NaF
5	6,24	6,65	3,01	5,84	1,71	9,49	8,31	1,94
6	7,19	6,37	2,89	5,60	1,64	10,92	7,97	1,86
7	8,05	6,12	2,77	5,38	1,58	12,23	7,66	1,79
8	8,85	5,89	2,67	5,17	1,52	13,45	7,37	1,72
9	9,60	5,68	2,57	4,98	1,46	14,58	7,10	1,66
10	10,29	5,48	2,48	4,81	1,41	15,63	6,85	1,60

Таблица 2

Результаты расчета адиабатических температур реакций (1)–(10)

Номер реакции	Адиабатическая температура реакции, T _{ад} , К	Номер реакции	Адиабатическая температура реакции, T _{ад} , К
1	1880	6	2757
2	2187	7	2884
3	2391	8	2972
4	2687	9	3026
5	2700	10	3042

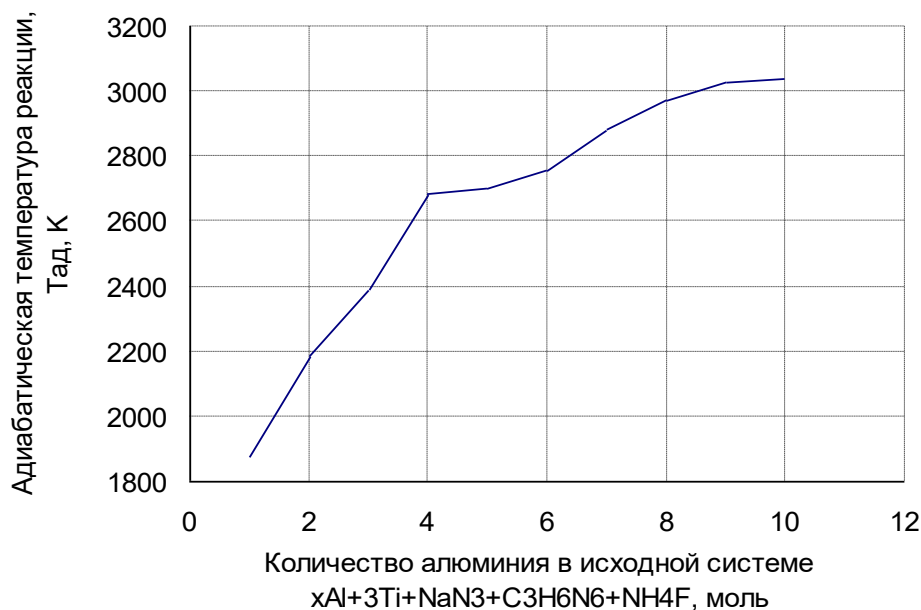


Рис. 1. Зависимость адиабатических температур реакций (1)–(10) от количества исходного алюминия

Из табл. 2 и зависимости, представленной на рис. 1, видно, что с увеличением количества алюминия в исходных компонентах адиабатические температуры реакций растут. Все предложенные реакции имеют достаточно высокую температуру для их самопроизвольного протекания в форме горения.

Второй расчет выполнялся при условии, что в результате реакции могут образоваться нитрид алюминия, нитрид титана, карбид титана, свободные алюминий, титан, углерод, натрий, трифторид алюминия (AlF₃) и гексафтороалюминат натрия (Na₃AlF₆). Результаты данных термодинамических расчетов представлены в табл. 3 и на рис. 2.

Результаты термодинамических расчетов

Номер реакции	Продукты реакции, моль											$T_{ад}$, К
	AlN	TiC	TiN	NaF(r)	H ₂	N ₂	C	Na ₃ AlF ₆	AlF ₃	Na(r)	Al(r)	
1	0,85	0,48	2,52	0,24	5	3,32	2,52	0,10	0,06	0,46	–	2201
2	1,84	2,22	0,78	0,26	5	3,69	0,78	0,09	0,07	0,47	–	2210
3	2,80	3	–	0,36	5	3,60	–	0,01	0,19	0,60	0,01	2307
4	3,75	3	–	0,26	5	3,13	–	–	0,25	0,74	0,01	2603
5	4,72	3	–	0,23	5	2,64	–	–	0,26	0,77	0,02	2700
6	5,72	3	–	0,23	5	2,14	–	–	0,26	0,77	0,02	2703
7	6,66	3	–	0,20	5	1,67	–	–	0,27	0,80	0,08	2842
8	7,54	3	–	0,18	5	1,23	–	–	0,27	0,82	0,18	2941
9	8,38	3	–	0,16	5	0,81	–	–	0,28	0,84	0,34	3004
10	8,96	3	–	0,15	5	0,52	–	–	0,28	0,85	0,76	3019



Рис. 2. Зависимость адиабатических температур реакций (1)–(10) от количества исходного алюминия

Из табл. 3 и зависимости, представленной на рис. 2, видно, что с увеличением количества исходного алюминия адиабатические температуры реакций растут. Все реакции имеют достаточно высокие температуры для их самопроизвольного протекания в форме горения.

Проведенные расчеты показали следующее:

1. В продуктах всех реакций синтезируется целевая композиция «нитрид алюминия – карбид титана».

2. В продуктах реакций (1) и (2) присутствует нитрид титана и свободный углерод, которые не являются целевыми продуктами синтеза и их отделение от целевой композиции представляется затруднительным.

3. В продуктах реакций (1)–(3) присутствует незначительное количество гексафтороалюмината натрия. Практически во всех реакциях образуется небольшое количество трифторида алюминия и свободных алюминия и натрия. Их количество с ростом адиабатической температуры реакции слабо увеличивается. Они образуются в газообразной фазе и могут в незначительном количестве присутствовать в готовом продукте.

Выводы

1. Адиабатические температуры всех рассмотренных реакций достаточны для их самопроизвольного протекания в форме горения, что является неотъемлемым условием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

2. Согласно проведенным термодинамическим расчетам, меланин может быть использован в качестве источника углерода для образования карбида титана в составе керамической композиции «нитрид алюминия – карбид титана», получаемой по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М., Верещагин В.И. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных нитридосодержащих керамических материалов. Новосибирск: Наука, 2012. 260 с.
2. Амосов А.П., Бичуров Г.В. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов. М.: Машиностроение-1, 2007. 526 с.
3. Марков Ю.М., Латухин Е.И. СВС нитрида алюминия с использованием активирующих добавок // Самара: Современные материалы, техника и технологии. 2019. № 5. С. 103–110.
4. Уварова И.А., Титова Ю.В., Майдан Д.А. СВС наноструктурированного порошка нитрида алюминия с применением различных классов галоидных солей и азида натрия // Самара: Современные материалы, техника и технологии. 2019. № 5. С. 181–190.
5. Получение высокодисперсной порошковой композиции AlN-TiC методом азидного СВС из шихты «Al-Ti-NaN₃-C₂F₄» / Г.С. Белова, Ю.В. Титова, Д.А. Майдан, А.Ф. Якубова // Физическое материаловедение: сб. матер. XI междунар. школы. Тольятти, 2023. С. 110–111.
6. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учеб. пособие. М.: Машиностроение-1, 2007. 568 с.
7. Амосов А.П. Развитие порошковой технологии СВС в Самаре // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Серия Технические науки. 2007. № 2. С. 77–87.

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ВНУТРЕННИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ К НЕОРГАНИЧЕСКИМ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯМ

Берков Д.В.^{1,2}, аспирант, ведущий инженер, **Верёвкин А.Г.**^{1,2}, магистрант, к.х.н., директор по развитию

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация,

² ООО «Научно-производственный центр «Самара», г. Самара, Российская Федерация
E-mail: berkov@npcsamara.ru; berkovd@mail.ru

Образование неорганических солеотложений на рабочей поверхности нефтегазового оборудования является одной из самых распространенных причин отказов на нефтегазовых месторождениях. Образующиеся в насосно-компрессорных трубах (НКТ) неорганические солевые отложения снижают пропускную способность трубопроводов, приводят к выходу оборудования из строя. Таким образом, проблема солеобразования в насосно-компрессорных трубах является актуальной и требует поиска оптимальных методов для решения. В настоящее время не до конца изучено применение защитных покрытий насосно-компрессорных труб как меры предотвращения или снижения образования неорганических солеотложений на их стенках. Для использования защитных покрытий в качестве меры противодействия отложению неорганических солей требуется разработка метода, позволяющего оценить способность покрытий, а также полимерных и металлических материалов предотвращать образование неорганических солеотложений на внутренней поверхности труб.

Ключевые слова: неорганические солеотложения, насосно-компрессорная труба, полимерное защитное покрытие, стенд, стойкость покрытий, метод испытаний

ASSESSMENT OF THE RESISTANCE OF INTERNAL PROTECTIVE COATINGS OF PUMP-COMPRESSOR PIPES TO INORGANIC SCALE DEPOSITS

Berkov D.V.^{1,2}, PhD student, leading engineer,
Verevkin A.G.^{1,2}, Master's Degree student, PhD in Chemical Sciences, development director

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation,

² LLC "Research and Production Center "Samara", Samara, Russian Federation
E-mail: berkov@npcsamara.ru; berkovd@mail.ru

The formation of inorganic scale deposits on the working surface of oil and gas equipment is one of the most common causes of failures at oil and gas fields. The inorganic scale deposits forming in tubing reduce the pipeline's throughput capacity, leading to equipment failure. Thus, the problem of scale formation in tubing is relevant and requires the search for optimal methods to solve it. Currently, the application of protective coatings on tubing as a measure to prevent or reduce the formation of inorganic scale deposits on the walls of pipes is not fully studied. To use protective coatings as a measure against the deposition of inorganic scale, it is necessary to develop a method that allows assessing the ability of coatings, as well as polymer and metallic materials, to prevent the formation of inorganic scale deposits on the internal surface of pipes.

Keywords: inorganic scale deposits, tubing, polymer protective coating, test bench, coating resistance, test method

Образование неорганических солеотложений в НКТ является одной из распространенных причин отказов на объектах нефтедобычи. Так, например, доля солеотложений в структуре осложненного фонда ООО «РН-Пурнефтегаз» составляет 13 % [1]. Солеотложения занимают 1 % в структуре осложненного фонда скважин ОАО «Удмуртнефть» [2]. Причиной значительного числа отказов, а именно 23 %, являются неорганические солеотложения на объектах ООО «Лукойл – Западная Сибирь» [3]. Солеотложения составляют 11 % осложненного фонда всего добывающего общества ПАО «Лукойл» [4]. Особо остро проблема

образования неорганических солей стоит для объектов ООО «ИНК» [5]. Это связано с геологическим строением осадочных пород, типичных для юга Сибирской платформы. В работе [5] рассматриваются подземные природные и техногенные воды Ярактинского, Верхнечонского и Братского месторождений, а также отложения солей, образующиеся в скважинах и насосном оборудовании в ходе добычи нефти и газа. Таким образом, проблема солеобразования в насосно-компрессорных трубах является актуальной и требует поиска оптимальных методов для решения.

Наименее изученным методом профилактики солеобразования в НКТ является применение внутренних защитных покрытий насосно-компрессорных труб. Применение защитных покрытий для профилактики солеотложений перспективно, так как помимо потенциального снижения солеобразования покрытия защищают нефтегазовое оборудование от коррозионных процессов и тем самым продлевают срок службы оборудования. Но важно понимать, что применение покрытий для предотвращения солеобразования не является универсальным методом, для каждого объекта требуется индивидуальный подбор защитного покрытия. Кроме того, на данный момент полностью не доказана эффективность применения данного метода. Подбор эффективного внутреннего покрытия (для предотвращения образования солей на поверхности оборудования) с помощью опытно-промысловых испытаний является дорогостоящей и долгой процедурой, поэтому необходима разработка лабораторного метода, позволяющего решить данную задачу.

Выпадение неорганических солеотложений на рабочей поверхности нефтегазового оборудования, в том числе на внутренней поверхности труб НКТ, вызвано тем, что содержащиеся в водном растворе соли превышают свой предел растворимости в воде. Есть три наиболее распространенных механизма, посредством которых происходит осаждение неорганических солеотложений:

- снижение давления или повышение температуры насыщенного водного раствора солей приводит к снижению растворимости солей. Чаще всего по такому механизму может проходить осаждение карбонатных солей и гипсовых отложений;

- смешение двух несовместимых вод. Это может происходить при попадании вод из разных пропластков. Например, одна из вод содержит ионы сульфата и бикарбоната, а другая – катионы, в основном кальция, бария и стронция. Когда данные воды смешиваются, происходит образование сульфатных отложений;

- испарение рассола, в результате чего концентрация соли увеличивается выше предела растворимости, что приводит к осаждению солей. Данный процесс зачастую возникает в газовых скважинах в условиях высокого давления и высокой температуры, где сухой газовый поток может смешиваться с солевым раствором при дегидратации с низкой скоростью; при этом наиболее часто происходит осаждение хлорида натрия [6]. Основные механизмы образования неорганических солеотложений при эксплуатации нефтяных месторождений были учтены при разработке стенда оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям, для того чтобы моделировать их при проведении испытаний.

В работе [7] утверждается, что механизм защитного действия таких покрытий основан на снижении прочности сцепления поверхности с осаждающимся слоем парафина или солей, что обеспечивает легкий срыв этого слоя и препятствует наращиванию отложений. Отсутствие обоснованной нормы на удельное усилие сдвига, при котором будет происходить срыв образующихся отложений, затрудняет выбор эффективных систем покрытий для защиты нефтегазопроводных труб [7]. Поэтому при разработке стенда была предусмотрена возможность осуществлять динамические испытания покрытий на стойкость к солеотложению при различных скоростных режимах (моделирующих различные скорости потока). Стендовые испытания позволяют определить (для каждого из испытываемых защитных покрытий НКТ), при каких скоростях потока возможен срыв формирующихся солеотложений с защитного покрытия.

С учетом требований для возможности моделирования солеобразующих сред, а также моделирования скоростных режимов потока был разработан и собран стенд оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям (рис. 1).

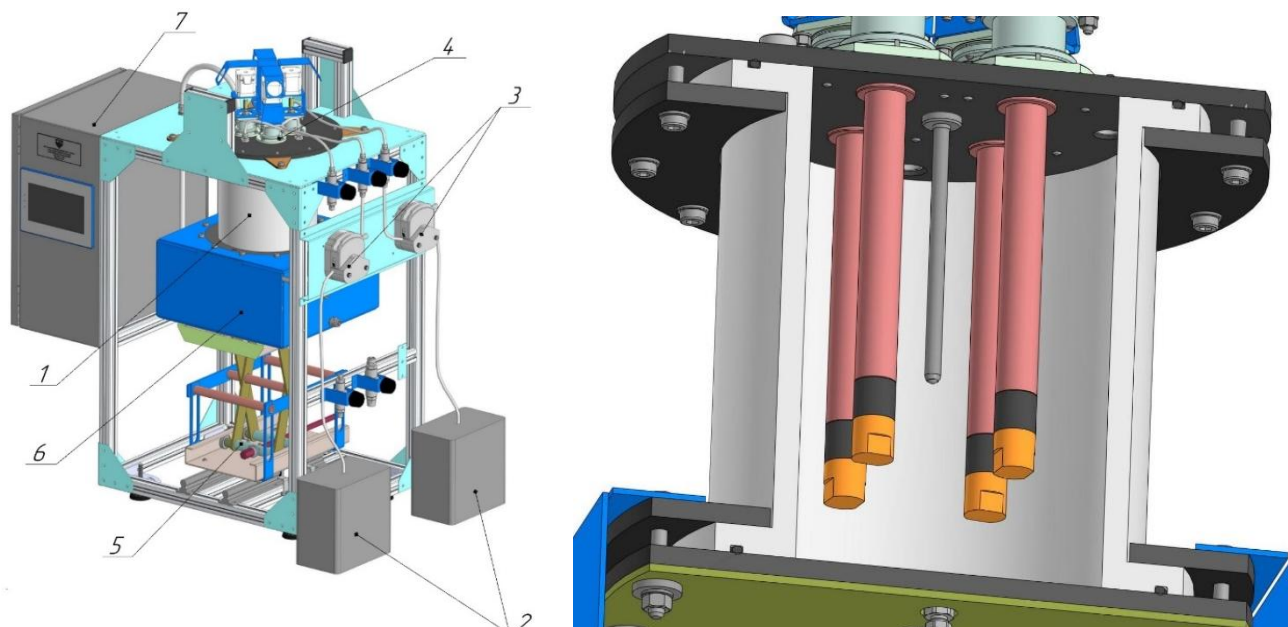


Рис. 1. Стенд оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям

1. Рабочая камера (реактор).
2. Емкости для подачи проб воды в реактор.
3. Перистальтические насосы для подачи проб в реактор.
4. Электропривод, обеспечивающий вращение образцов с заданной скоростью.
5. Подъемный механизм.
6. Система нагрева и поддержания температуры в реакторе.
7. Блок управления для настройки требуемых условий испытания (скорость подачи воды из емкостей в реактор, температура среды в реакторе, скорость вращения образцов).

Для моделирования движения жидкости относительно испытуемого защитного покрытия труб НКТ был выбран метод «вращающихся цилиндров». Вращение цилиндра (с нанесенным на его внешнюю поверхность защитным покрытием) в солеобразующей среде моделирует течение потока солеобразующей жидкости относительно защитного покрытия. Помимо покрытий предусмотрена возможность проводить испытания различных полимерных и металлических материалов. Процессы солеотложения в рабочей камере (реакторе) можно проводить различными способами:

- испарением испытуемой жидкости из реактора;
- подачей в реактор несовместимых вод;
- подачей углекислого газа в реактор (осуществление барботажа).

Технические возможности стенда оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям позволяют задавать и контролировать следующие параметры:

- температура среды в реакторе, °С;
- скорость вращения образцов, об/мин;
- скорость подачи жидкости в реактор из емкости (1), мл/мин;
- скорость подачи жидкости в реактор из емкости (2), мл/мин.

Таким образом был разработан и сконструирован стенд, позволяющий проводить испытания для оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям. Процесс разработки стенда оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям подробно описан в работе [8]. 13 июня 2023 г. была подана заявка (№ 2023115483) в Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС) для получения патента на изобретение «Лабораторный исследовательский стенд для оценки стойкости внутренних покрытий нефтепромысловых труб к неорганическим солеотложениям» [9].

Разработанный в [8] стенд оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям был применен для оценки стойкости защитных покрытий к солеотложениям гипсового

типа с примесями галита. Вращение цилиндров в водной минерализованной среде моделирует поток жидкости вдоль стенок труб НКТ. Внешняя поверхность цилиндрических образцов представляет собой модель внутренней поверхности трубы НКТ. Испытания были проведены при следующих скоростях вращения цилиндрических образцов: 100 об/мин, 500 об/мин, 1000 об/мин, 2000 об/мин, 3000 об/мин, что является эквивалентом линейных скоростей жидкости в трубе 0,1 м/с, 0,5 м/с, 1 м/с, 2 м/с, 3 м/с. Результаты проведенных исследований были опубликованы в работе [10]. На рис. 2 представлена зависимость массы солеотложений на различных покрытиях от моделируемой скорости потока.

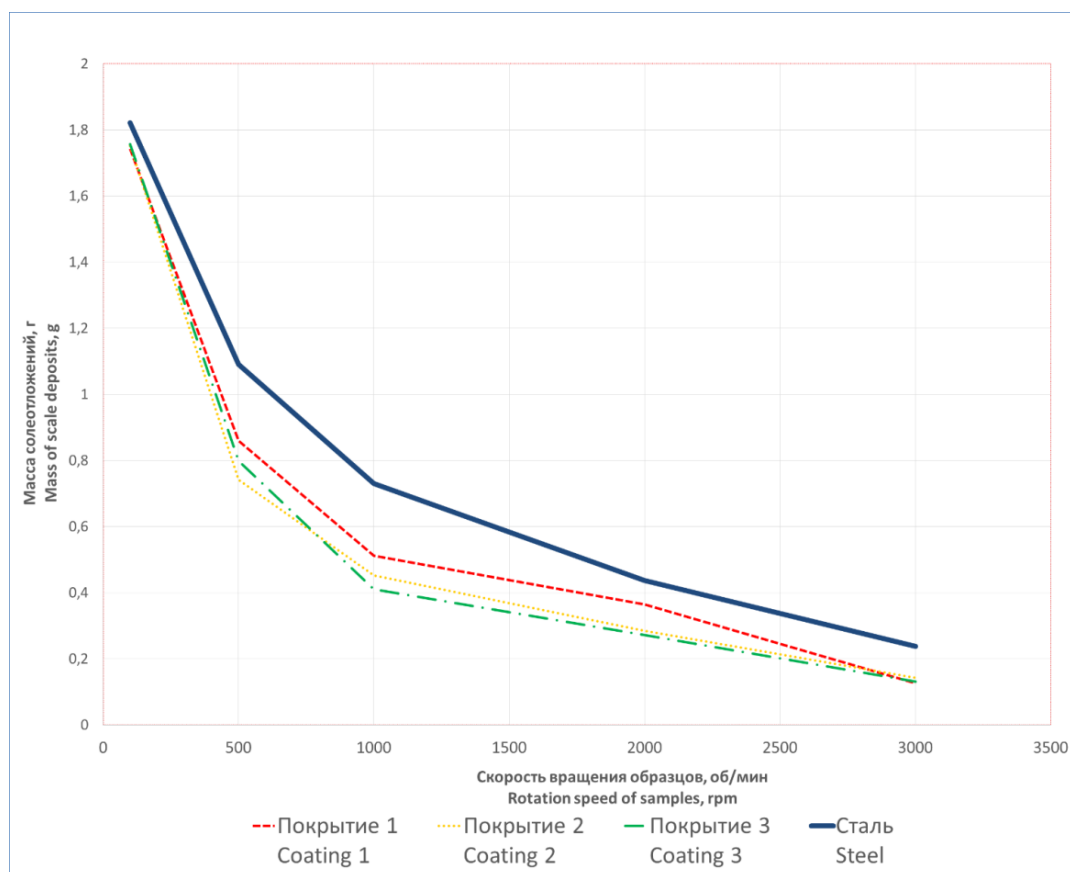


Рис. 2. Влияние скорости потока на процесс отложения солей [10]

Были изучены процессы формирования слоя солеотложений на различных марках защитных покрытий НКТ. Исследована зависимость между массой слоя солеотложений и скоростью вращения образца (эквивалент скорости потока в трубе). Эффективность применения НКТ с внутренним антикоррозионным покрытием (ВАКП) как меры по борьбе с солеотложениями на данном этапе однозначно не установлена [10].

В настоящее время продолжается работа по разработке метода оценки стойкости защитных покрытий НКТ к неорганическим солеотложениям. Готовятся к опубликованию статьи, в которых будут представлены результаты стендовых испытаний для большего (по отношению к [10]) количества марок защитных покрытий и полимерных материалов. Также планируется опубликование работы, в которой будет предложен лабораторный метод оценки комплексного применения защитных покрытий НКТ и ингибиторов солеотложения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аминова Р.Р. Влияние солеотложений на экономические показатели предприятия // Инновационные идеи молодых исследователей. 2020. С. 186–189.
2. Стецюк И.А. Анализ эффективности применения различных методов защиты ГНО скважин осложненного фонда ООО «РН-Пурнефтегаз» // Инженерная Практика. 2017. № 8. С. 40–43.

3. Оценка эффективности применения магнитного индуктора для борьбы с АСПО на добывающем фонде ОАО «Удмуртнефть» / А.А. Агафонов, И.Г. Наседкин, Н.В. Новикова, Н.С. Булдакова // Инженерная Практика. 2020. № 1. С. 20–24.
4. Хасанов И.Г. Итоги работы с механизированным фондом скважин ООО «Лукойл – Западная Сибирь» за 2012–2016 гг. // Инженерная Практика. 2017. № 11. С. 14–21.
5. Ренев Д.Ю. Результаты работы с механизированным фондом скважин ПАО «Лукойл» за 2021 год // Инженерная Практика. 2022. № 4. С. 4–7.
6. Гидрогеологические аспекты проблемы солеотложения в скважинах на примере месторождений Непско-Ботуобинской и Ангаро-Ленской нефтегазоносных областей / А.М. Кононов и др. // Подземные воды востока России. 2018. С. 259–265.
7. Галикеев И.А., Насыров В.А., Насыров А.М. Эксплуатация месторождений нефти в осложненных условиях: учеб. пособие. М.: ИнфаИнженерия, 2019. 356 с.
8. Протасов В.Н., Мурадов А.В. Методологические основы выбора материалов полимерных покрытий для предотвращения образования значительных отложений парафинов и минеральных солей на внутренней поверхности нефтегазопроводных труб // Территория Нефтегаз. 2008. № 3. С. 36–43.
9. Разработка стенда оценки стойкости внутренних защитных покрытий НКТ к неорганическим солеотложениям / Д.В. Берков, И.И. Костюк, П.Е. Юдин, А.Г. Верёвкин // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22. № 1. С. XX. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-1-6-17>
10. Заявка № 2023115483 от 13.06.2023 в Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС) [Электронный ресурс] Режим доступа: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2023115483&TypeFile=html
11. Оценка возможности применения защитных полимерных покрытий насосно-компрессорных труб для предотвращения образования неорганических солеотложений в трубах / Д.В. Берков, И.И. Костюк, П.Е. Юдин, А.Г. Верёвкин // Территория Нефтегаз. 2023. № 3–4. С. 66–81. EDN NRXURO.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ В СУДОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Бедретдинов И.Р.^{1,2}✉, инженер-технолог I категории, аспирант

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 и возможные пути повышения качества сварных швов с использованием различных способов сварки. Роботизация сварочных процессов повышает качество сварных швов путем оптимального подбора необходимых параметров процесса с помощью управляющей программы. Использование гибридных технологий способно повысить эффективность и качество сварных швов за счет совмещения в себе преимуществ различных технологий и компенсации их индивидуальных недостатков. В результате использования импульсного магнитного поля (ИМП) совместно с процессом сварки в кристаллизующемся металле сварочной ванны за счет действия наводимых вихревых токов возникают внутренние дополнительные источники тепла, происходит дробление зерен металла, увеличение центров кристаллизации и измельчение структуры в самом шве и в околошовной зоне, что положительно влияет на качество. Улучшить качество можно за счет совершенствования технологических параметров.

Ключевые слова: судостроение, электродуговая сварка, роботизация процесса сварки, гибридные технологии, магнитно-импульсная обработка

WAYS TO IMPROVE THE QUALITY OF WELDS IN SHIPBUILDING PRODUCTION

Bedretdinov I.R.^{1,2}✉, industrial engineer, category I, PhD student

¹ CJSC Nefteflot, Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: ilham.bedrov@gmail.com

The main problems and possible ways to improve the quality of welds using various welding methods are considered. Robotization of welding processes improves the quality of welds by optimally selecting the necessary process parameters using a control program. The use of hybrid technologies can improve the efficiency and quality of welds by combining the advantages of various technologies and compensating for their individual disadvantages. As a result of the use of a pulsed magnetic field (PMF) together with the welding process in the crystallizing metal of the weld pool due to the action of induced eddy currents, internal additional heat sources arise, metal grains are crushed, crystallization centers increase and the structure in the weld itself and near-weld is refined zone, which has a positive effect on quality. Quality can be improved by improving technological parameters.

Keywords: shipbuilding, electric arc welding, robotization of the welding process, hybrid technologies, magnetic pulse processing

В современном судостроении, и не только, распространенным способом соединения деталей является сварка. На данный момент существует множество способов сварки (ручная, механизированная, автоматическая, плазменная, электронно-лучевая и др.) и их разновидностей (дуговая, аргонодуговая, плавящимся и неплавящимся электродом, проволокой и т. д.). В судостроении в основном применяется термический способ, представленный всеми разновидностями дуговой сварки (в инертных газах, под флюсом и т. д.). В наше время технология сварочных работ изучена и отработана на достаточно высоком уровне. Однако вероятность

появления дефектов при создании корпусных конструкций все еще высока. В сварных конструкциях, в которых присутствуют дефекты сварки, появляются концентраторы напряжений, ослабляющие сварной шов и, как следствие, снижающие эксплуатационную надежность конструкции судна [1]. Развитие таких дефектов может привести к возникновению аварий и серьезных разрушений конструкции, что влечет за собой опасность для экипажа и в отдельных случаях – для окружающей среды.

В настоящее время дуговая сварка остается самым распространенным видом сварочных соединений, если рассматривать сварку плавлением. Это объясняется возможностью применения данного вида в различных условиях и положениях, доступностью, невысокой ценой расходных материалов, высокой концентрацией тепловой энергии в зоне проведения сварочных работ, универсальностью процесса. Также этот способ сварки обладает стабильной прочностью самого сварного соединения.

Электродуговая сварка характеризуется местным нагревом металла в зоне сварного шва и переводом его в состояние с последующим относительно быстрым его охлаждением и кристаллизацией. Эти процессы обуславливают возникновение в зоне шва дефектов различной природы и остаточных напряжений, которые остаются и могут иметь критическое значение после прекращения процесса сварки.

Процесс устранения данных дефектов приводит к увеличению трудоемкости изготовления изделия, материалоемкости, ухудшению условий труда (часто приходится работать в неудобном и стесненном положении), после дополнительных работ по устранению дефектов изменяется поперечная площадь сечения сварного шва, что может ухудшить прочностные характеристики изделия.

На крупных судостроительных заводах используется полуавтоматическая сварка расходуемым электродом, в редких случаях – ручная сварка. С увеличением объема выпускаемой продукции неизбежно возрастает количество сварных соединений. В результате повышается доля дефектов в сварных швах.

Предприятие «ЗАО «Нефтефлот» помимо судоремонтных работ начало заниматься строительством судов. Уже построен проект промерного судна, модернизирован танкер под большее водоизмещение, строится проект земснаряда и ожидается закладка нескольких новых судов пассажирского типа. В связи с увеличением сварочных работ в процессе постройки судов возросло количество сварных швов и появились проблемы с дефектами (см. рисунок).

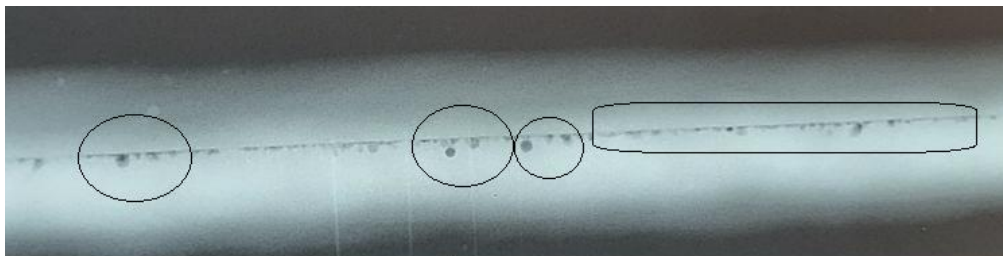
Перспективным направлением в улучшении качества может стать роботизация процесса сварки, при этом по-прежнему важным является совершенствование технологических процессов [2]. Наряду с вышеописанным вариантом стоит рассмотреть использование роботизированного способа сварки [3, 4].

Актуальность роботизированных комплексов возрастает при создании плоских и протяженных конструкций. В составе корпуса на больших судах (сухогрузы, танкеры, рудовозы, круизные лайнеры и т. д.) присутствует большое количество таких деталей, как карлингсы, бимсы, бортовые и днищевые стрингеры и т. д.

При роботизации качество сварного шва по-прежнему определяют следующие важные технологические параметры: стабильность сварочного тока и напряжения, скорости сварки и подачи электродной проволоки, регулирования вылета электрода и т. д. [5].

Существует одна проблема, у которой еще нет оптимального решения. Это управление положением сварочной головки относительно кромок стыка.

Следует отметить, что программное управление перемещением головки по свариваемому контуру приемлемо лишь при сварке коротких швов для негабаритных изделий. В случае сварки протяженных конструкций программное управление неприменимо ввиду невозможности на практике точного позиционирования изделия относительно запрограммированной траектории. При осуществлении сварки прямолинейных конструкций с использованием робота позиционирование горелки достаточно просто решается программно. Однако появляются сложности при необходимости проведения сварочных работ по криволинейной траектории, особенно в разных плоскостях [6].



a



б

Дефекты сварного шва при полуавтоматическом способе сварки:

a – поры и непровар; *б* – шлаковые включения и поры

В последнее время для повышения эффективности автоматизированных и роботизированных производственных процессов развивается подход, получивший название «гибридные технологии». Под данным термином понимается совокупность технологий, позволяющих дополнить их положительные стороны и устранить индивидуальные недостатки [7]. В связи с тем, что электродуговая сварка достаточно легко роботизируется за счет применения многоосевых роботов-манипуляторов, она может интегрироваться с другими технологическими процессами для повышения качества сварного шва и околошовной зоны: сварка – прокатка, сварка – дробеструйная обработка, сварка – лазерное упрочнение. В качестве разновидности гибридной технологии перспективным является способ повышения качества сварного шва с применением магнитно-импульсной обработки при дуговой сварке. В результате воздействия импульсного магнитного поля (ИМП) в кристаллизующемся металле сварочной ванны за счет действия наводимых вихревых токов возникают внутренние дополнительные источники тепла. При этом действие интенсивных металлопоток за счет электродинамических сил приводит к дроблению зарождающихся зерен, увеличению центров кристаллизации и в конечном счете – к измельчению структуры как в самом шве, так и в околошовной зоне. В процессе МИО происходит интенсивное комплексное теплосиловое воздействие на кристаллизующийся расплав. Так, помимо силового воздействия за счет электродинамических сил в расплаве ванны сварного шва возникают внутренние дополнительные источники тепла от действия наводимых вихревых токов [8].

Таким образом, было показано, что развитие роботизированных комплексов для проведения сварочных работ в судостроительном производстве, использование МИО в процессе сварки и применение гибридных технологий являются перспективными направлениями развития сварочной отрасли. Магнитно-импульсная обработка является наиболее эффективным способом улучшения качества сварного шва наряду с совершенствованием технологических процессов сварки. В случае МИО повышается качество шва за счет измельчения структурных составляющих в самой зоне шва за счет воздействия электродинамических сил, вызванных импульсным магнитным полем. Более совершенные технологические процессы и курс на автоматизацию сварочных процессов способны существенно улучшить качество сварки. Гибридные технологии совмещают в себе преимущества различных технологий и компенсируют индивидуальные недостатки, тем самым повышая эффективность и качество.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тальпов Г.Б. Сварочные деформации напряжения / Под ред. Н.С. Соломенко. Л.: Машиностроение, 1973. 280 с.
2. Пашева Т.Ю. Повышение качества изготовления корпусных конструкций судов путем совершенствования управления технологическими процессами: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.04. СПб.: Санкт-Петербург. гос. морской техн. ун-т, 2012. 23 с.
3. Мельников А.Ю. Применение роботов в сварочном производстве (примеры реализации) // Технологии и материалы. 2015. № 1. С. 24–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-robotov-v-svarochnom-proizvodstve-primery-realizatsii/viewer/> (дата обращения: 15.04.2024).
4. Минкин А.В., Мингалиев М.А., Токбаева В.В. Применение робототехники в сварочной технологии // NovaInfo. 2018. № 77. С. 45–48. URL: <https://novainfo.ru/article/14547> (дата обращения: 15.04.2024).
5. Тупиков Н.Г. Методы и средства автоматизации процессов электродуговой сварки в защитных газах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. Тула: Тульск. гос. ун-т, 2001. С. 32.
6. Панарин В.М. Методы и средства автоматизации процесса электродуговой сварки протяженных швов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. Тула, 1999. С. 39.
7. Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей / А.В. Балякин, М.А. Олейник, Е.П. Злобин, Д.Л. Скуратов // Вестник Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21. № 2. С. 48–64.
8. Применение магнитно-импульсной обработки при электродуговой сварке АД1Н / К.В. Никитин, С.С. Жаткин, Д.Г. Черников, А.К. Скороумов, Д.А. Дунаев, В.А. Новиков // Литье и металлургия. 2023. С. 101–108.

ХИМИЧЕСКАЯ СТАДИЙНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ СИАЛОНА ПО АЗИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВС ИЗ СИСТЕМЫ $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$

Валяева М.Е., аспирант, Кондратьева Л.А., профессор, д.т.н., доцент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: valiaeva.maria@yandex.ru, schiglou@yandex.ru

Описана химическая стадийность получения сialона в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из системы $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$. Показано, что в процессе твердопламенного горения происходит большое количество химических реакций, приводящих к получению конечного продукта.

Ключевые слова: химическая стадийность, диоксид кремния, сialон, синтез, СВС-Аз

CHEMICAL STAGES OF OBTAINING SIALONE USING THE AZIDE TECHNOLOGY OF SHS FROM THE SYSTEM “ $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ ”

Valyaeva M.E., PhD student, Kondratyeva L.A., Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: valiaeva.maria@yandex.ru, schiglou@yandex.ru

This work describes the chemical stages of obtaining sialon in the process of self-propagating high-temperature synthesis from the system $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$. It has been shown that during solid-flame combustion a large number of chemical reactions occur, leading to the production of the final product.

Keywords: chemical stages, silicon dioxide, sialon, synthesis, SHS-Az

В настоящее время известно, что керамические материалы на основе нитрида кремния обладают высокой термической, химической и механической стабильностью, что определяет области их применения, включая машиностроение, аэрокосмическую, химическую и медицинскую промышленность [1]. Вместе с тем данной керамике свойственно окисляться на воздухе, что ограничивает ее применение.

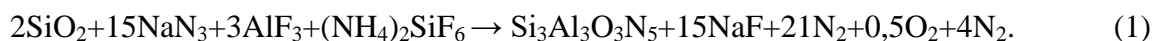
Среди материалов на основе нитрида кремния оксинитриды кремния и алюминия (SiAlON) обладают особенно высокой стойкостью к окислению, а также вышеупомянутыми свойствами нитрида кремния. Данное соединение представляет собой твердый раствор, полученный путем частичного замещения кремния и азота алюминием и кислородом соответственно в решетке Si_3N_4 . Физические и механические свойства близки к Si_3N_4 , а химические – к оксиду алюминия [2].

Различают до 10 типов сialонов, самыми востребованными из которых являются α -, β -сialоны и α/β -сialоны. Структура сialона в первую очередь является производной от структуры Si_3N_4 ; следовательно, сialоны характеризуются гексагональной (β -сialон), тригональной (α -сialон) или двойной α/β смесью структур. Как правило, β -сialон легче формировать в виде удлинённых шестиугольных зерен, в то время как α -сialон обычно имеет равноосную форму. Существует пригодное для использования превращение между α -сialоном и β -сialоном, которое, по сути, обратимо за счет включения или исключения межзеренной стеклообразной фазы. Равноосная морфология зерен, как правило, приводит к получению материала с более низкой прочностью и вязкостью по сравнению с β -сialоном. Однако α -сialон обычно имеет более высокую твердость, чем β -сialон. β -сialон обладает высокой вязкостью при разрушении, но имеет более низкую твердость, износостойкость и термостойкость. β -сialон характеризуется отличными свойствами, такими как высокая вязкость разрушения, хорошая коррозионная стойкость и химическая стабильность, высокая стойкость

к термическому удару, высокая прочность и хорошая способность противостоять окислению, что делает его пригодным для использования в качестве режущего инструмента, огнеупорного и высокоэффективного материала. С другой стороны, α -сиалон больше подходит для инженерных применений благодаря своей высокой твердости и превосходной стойкости к износу, окислению и высокотемпературным операциям. Керамика из смешанного α/β -сиалона также хорошо изучена, поскольку такие материалы сочетают в себе ударную вязкость β -сиалона и износостойкость α -сиалона. Данный тип сиалона является перспективным режущим инструментом для обработки труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные сплавы на основе никеля, из-за их превосходных механических свойств, которые имеют большое значение для промышленного применения. Хотя полученные композиты демонстрируют лучшие механические свойства по сравнению с монокристаллическими, фазовое превращение α -в- β , происходящее при более высоких температурах, ограничивает функциональность композитов α/β -сиалонов [3, 4, 5].

Оксинитриды кремния-алюминия могут быть получены методами реакционного и искрового плазменного спекания, золь-гель-технологией, карботермическим восстановлением и азотированием, а также механохимическим путем из природных алюмосиликатных минералов [6, 7]. Данные технологии характеризуются высоким энергопотреблением, длительностью проведения синтеза и сложным оборудованием. Описанные недостатки могут быть устранены с использованием процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). СВС является эффективным и экономичным методом, который использует тепло экзотермических реакций, мгновенно генерирующих высокую температуру для достижения процесса спекания керамики. В сочетании с простым оборудованием, использованием недорогих исходных реагентов и экологичностью данный метод обладает большими преимуществами по сравнению с традиционными технологиями [8].

В работе [2] был синтезирован сиалон по азидной технологии СВС из системы $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$. В качестве кремнийсодержащего компонента был взят речной песок, а использование азида натрия позволяет добиться более высокой полноты азотирования в сравнении с традиционным СВС. Применение галоидных солей, имеющих в своем составе аммонийную группу, в реакционной шихте позволяет устранять свободный натрий из конечного продукта синтеза. В результате образуется нейтральная соль, которая устраняется с помощью водной промывки. Также в синтезе СВС-Аз используются не дорогие нанопорошки, а более бюджетные микронные, что позволяет их лучше смешивать. Уравнение для получения сиалона с применением азида натрия и галоидных солей выглядело следующим образом:



В таблице представлены результаты термодинамических расчетов возможности получения сиалона из системы $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$, проведенных с помощью программы Thermo. Из таблицы видно, что система способна к самостоятельному горению. Отрицательные значения энтальпии указывают на экзотермичность реакции, следовательно, синтез будет сопровождаться выделением тепла.

Результаты термодинамических расчетов системы $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$

Термодинамическая характеристика	Значение
Адиабатическая температура T_p , К	1558,54
Тепловой баланс системы (энтальпия), кДж	-8573,84

Эксперимент по синтезу сиалона из системы $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ проводился в лабораторном реакторе СВС-Аз с исходными условиями синтеза: плотность реакционной шихты – относительная ($\delta = 0,34$), диаметр экспериментального образца – 3 см, давление

газообразного азота в реакторе – 4 МПа. Схема синтеза сиалона методом СВС-Аз представлена на рис. 1 [9].

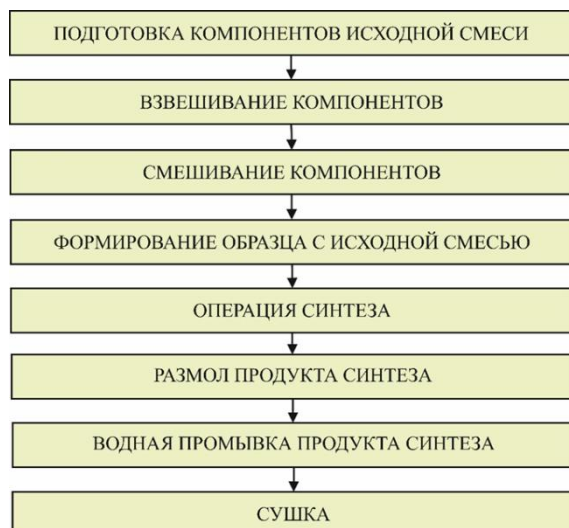


Рис. 1. Технологическая схема синтеза сиалона методом СВС-Аз

Дифрактограмма конечного промытого продукта представлена на рис. 2. Установлено, что в синтезированном порошке обнаружена целевая фаза состава – сиалон $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$, а также выявлено присутствие побочных фаз AlN , NaF , Si_3N_4 , Na_3AlF_6 и Si [2].

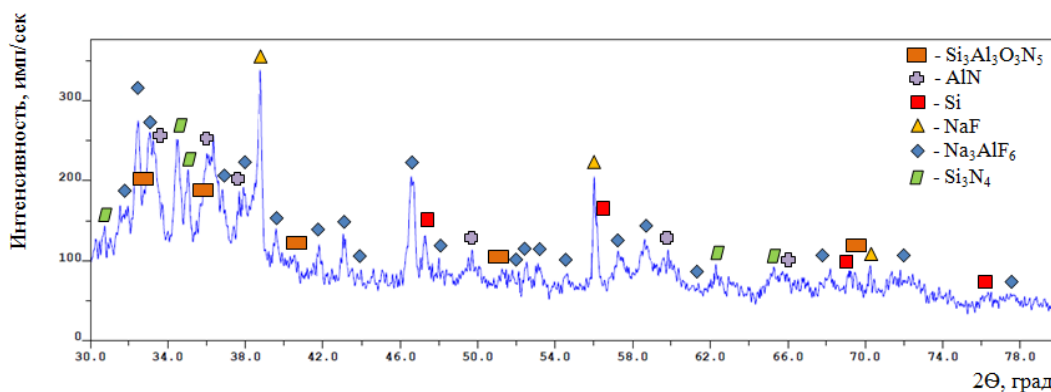


Рис. 2. Дифрактограмма продукта горения системы $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$

Целью данной работы является исследование химической стадийности образования сиалона из системы $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$. Исходя из результатов рентгенофазового анализа можно сделать предположение о механизме получения целевого продукта и записать следующее уравнение:

1. Азид натрия NaN_3 разлагается при температуре $\sim 275^\circ\text{C}$:



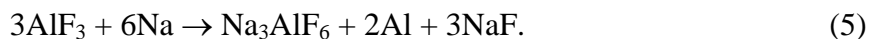
2. При температуре $\sim 300^\circ\text{C}$ происходит разложение гексафторсиликата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$:



3. Следом SiF_4 разлагается на:



4. Дальнейшее повышение температуры приводит к взаимодействию фторида алюминия с натрием, образовавшимся при разложении NaN_3 :



5. Затем при температуре $\sim 700^\circ\text{C}$ фторид алюминия начинает разлагаться на алюминий и фтор:



6. Далее происходит химическая реакция взаимодействия свободного натрия, полученного при разложении азида натрия, и газообразного фтора с образованием фторида натрия:



7. При температуре около 800°C алюминий, образовавшийся в результате реакции комплексообразования, реагирует с атомарным азотом и аммиаком до образования нитрида алюминия:



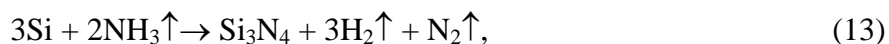
8. Далее часть гексафторалюмината натрия диссоциирует при температуре 1000°C :



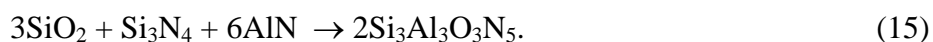
9. Часть непрореагировавшего гексафторалюмината натрия вступает в реакцию восстановления с натрием ($\sim 1200^\circ\text{C}$), в результате чего образуется алюминий и фторид натрия. Впоследствии алюминий азотируется при температуре $800\text{--}1100^\circ\text{C}$ до получения нитрида алюминия:



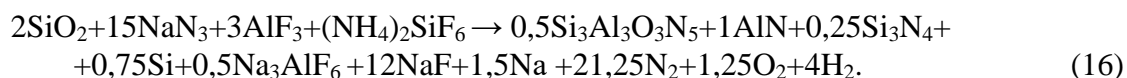
10. После этого элементный кремний, образованный при разложении фторида кремния, вступает в реакцию с аммиаком, образовавшимся при разложении гексафторсиликата аммония, а также с газообразным азотом, закачанным в реактор, образуя нитрид кремния ($\sim 1200^\circ\text{C}$):



11. Затем диоксид кремния в виде речного песка при температуре $\sim 1250^\circ\text{C}$ вступает в реакцию с нитридом алюминия и нитридом кремния:



Суммарная реакция получения сиалона методом СВС-Аз имеет вид



Наличие свободного натрия в синтезируемом продукте было установлено с помощью лакмусовой бумаги, синий цвет которой указывает на щелочную среду промывной воды.

Таким образом, результаты рентгенофазового анализа позволили предположить механизм получения целевого продукта, синтезированного по азидной технологии СВС из системы $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Synthesis and phases relationships of $\text{Si}_6\text{-zAl}_z\text{O}_z\text{N}_{8\text{-z}}$ in a wide range of z / Nailya S. Akhmadullina, Anton S. Lysenkov, Anatoly A. Konovalov, Ekaterina A. Obraztsova, Konstantin A. Kim, Yury F. Kargin // *Ceramics International*. 2022. V. 48. I. 9. Pp. 13348–13355.
2. Валяева М.Е., Кондратьева Л.А. Синтез сиалона из СВС-системы в режиме твердопламенного горения // *Транспортное машиностроение*. 2023. № 3 (15). С. 4–13.
3. Development and analysis of functionally-graded SiAlON composites with computationally designed properties for cutting inserts / Abba A. Abubakar, Syed Sohail Akhtar, Amer D. Alotaibi, Khaled S. Al-Athel, Abbas S. Hakeem, Akeem Yusuf Adesina // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. V. 23. Pp. 5861–5879.
4. Improvement of cutting performance of high x value α/β -SiAlON ceramic cutting inserts via tailoring microstructure and oxidation behavior / Dongbo Hong, Zengbin Yin, Fuzhou Guo, Juntang Yuan // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023. V. 111. 106087.
5. Development and microstructural analysis of beta-SiAlONs produced by spark plasma sintering / L.J. Letwaba, I. Tlhabadira, I.A. Daniyan, M. Seerane, E.R. Sadiku, L. Masu // *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 38. Part 2. Pp. 590–594.
6. MacKenzie K.J.D., Van Barnevel D. Carbothermal synthesis of β -SiAlON from mechanochemically activated precursors // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2006. V. 26. Pp. 209–215.
7. Валяева М.Е., Кондратьева Л.А. Обзор методов получения сиалона // *Современные материалы, техника и технологии*. Курск, 2021. № 4 (37). С. 10–16.
8. Валяева М.Е., Кондратьева Л.А. СВС как метод получения сиалона // *Современные материалы, техника и технологии*. Курск, 2022. № 6 (45). С. 27–34.
9. Кондратьева Л.А. Схема азидной технологии саморапространяющегося высокотемпературного синтеза порошков нитридов // *Журнал технических исследований*. 2020. Т. 6. № 1. С. 3–9.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОЙ СФЕРОИДИЗАЦИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКА INCONEL 718

Васильев И.С. ✉, аспирант, **Мозжерин В.В.**, студент, **Терентьев А.А.**, старший преподаватель, **Нагулин К.Ю.**, доцент, д.т.н., профессор, **Гильмутдинов А.Х.**, д.ф.-м.н., профессор

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: ilyavasi.levi@yandex.ru*

Представлены результаты воздействия индуктивно связанной плазмы на порошок Inconel 718 для аддитивного производства. Проанализировано влияние на такое технологическое свойство, как степень сферичности для исходного и обработанного порошка. Отмечена перспективность использования обработки низкотемпературной плазмой для улучшения технологических свойств порошковых материалов для аддитивного производства.

Ключевые слова: плазменная сфероидизация, индуктивно связанная плазма, порошок для аддитивного производства

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE PLASMA SPHEROIDIZATION PROCESS ON THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF INCONEL 718 POWDER

Vasilyev I.S. ✉, PhD student, **Mozzherin V.V.**, student, **Terentyev A.A.**, senior lecturer, **Nagulin K.Yu.**, Associate Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Gilmutdinov A.Kh.**, Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation
E-mail: ilyavasi.levi@yandex.ru*

The results of the effect of inductively coupled plasma on Inconel 718 powder for additive manufacturing are presented. The influence on such a technological property as the degree of sphericity for the initial and processed powder is analyzed. The prospects of using low-temperature plasma treatment to improve the technological properties of powder materials for additive manufacturing are noted.

Keywords: plasma spheroidization, inductively coupled plasma, powder for additive manufacturing

Машиностроение является одной из ведущих отраслей науки и техники. Помимо необходимости увеличения объемов производства современное машиностроение сталкивается и с прочими проблемами – от потребности в автоматизации до повышения точности и создания изделий сложной геометрической формы. С решением некоторых из этих проблем может помочь применение технологии трехмерной печати, являющейся частью аддитивного производства.

Аддитивное производство, выступающее в противовес традиционным субтрактивным методам, представляет собой комплекс технологий послойного нанесения материала. Подобный подход имеет множество плюсов, как то: создание форм практически неограниченной геометрической сложности, экономное использование сырья, возможность упрощенного прототипирования [1].

Аддитивные технологии включают в себя три основных направления исследований: получение порошковых материалов, оборудование для печати и технологии постобработки. Требования, предъявляемые к порошковым материалам, можно разделить на химические, физические и технологические. Химические свойства включают в себя гомогенный состав материала, отсутствие в нем примесей, физические – отсутствие сателлитов, агломераций, полостей, трещин и иных дефектов формы, а технологические свойства – степень сферичности, гранулометрический состав, насыпная плотность, текучесть.

Существует множество способов получения порошкового сырья – от механической обработки дроблением и резанием до диспергирования расплава [2]. Однако порошок, полученный высокопроизводительными и относительно дешевыми методами, такими как газовое диспергирование, зачастую имеет неправильную форму и газовые включения. Альтернативным способом получения высококачественного порошка является метод доработки коммерчески доступного порошка в термической плазме.

Такой способ получил название плазменной сфероидизации. Для обработки порошков традиционно используется индуктивно связанная плазма [3]. Такая плазма возникает в индукцируемом катушкой индуктивности электромагнитном поле мегагерцового диапазона. По сравнению с электродуговым или СВЧ-разрядом использование индуктивно связанной плазмы имеет ряд преимуществ: отсутствие загрязнения плазмы продуктами деградации электрода, большой занимаемый плазмой объем, невысокая скорость истечения плазмы, что позволяет частицам дольше находиться в нагретой области. Кроме того, технология разработки и настройки радиочастотных плазмотронов достаточно хорошо разработана [4]. Вышеперечисленные достоинства позволили методу плазменной сфероидизации прочно закрепиться в сфере обработки порошковых материалов.

Применяемая в данной работе установка состоит из радиочастотного генератора, системы подачи газов, двухконтурной охлаждающей системы и бункера для сбора порошка.

Источником электромагнитных колебаний установки служит высокочастотный генератор ИВЧ09-84-5.28, который работает на частоте 5,28 МГц. Колебания через нагрузочный контур и фидер подаются на медный водоохлаждаемый индуктор. Основным рабочим органом установки является высокочастотный индукционный плазмотрон, представленный на рис. 1. В него вводятся пространственно разделенные потоки аргона, которые ионизируются в электромагнитном поле индуктора. Для инициации плазменного разряда вплотную к кварцевой колбе плазмотрона подведен высоковольтный электрод катушки Теслы. В плазмоид через водоохлаждаемый зонд вводится обрабатываемый порошок, при этом, согласно ранее проведенным расчетам, он вводится в зону наиболее высокой температуры [5]. Параметры обработки порошка, осуществленной в рамках настоящей работы, приведены в табл. 1.

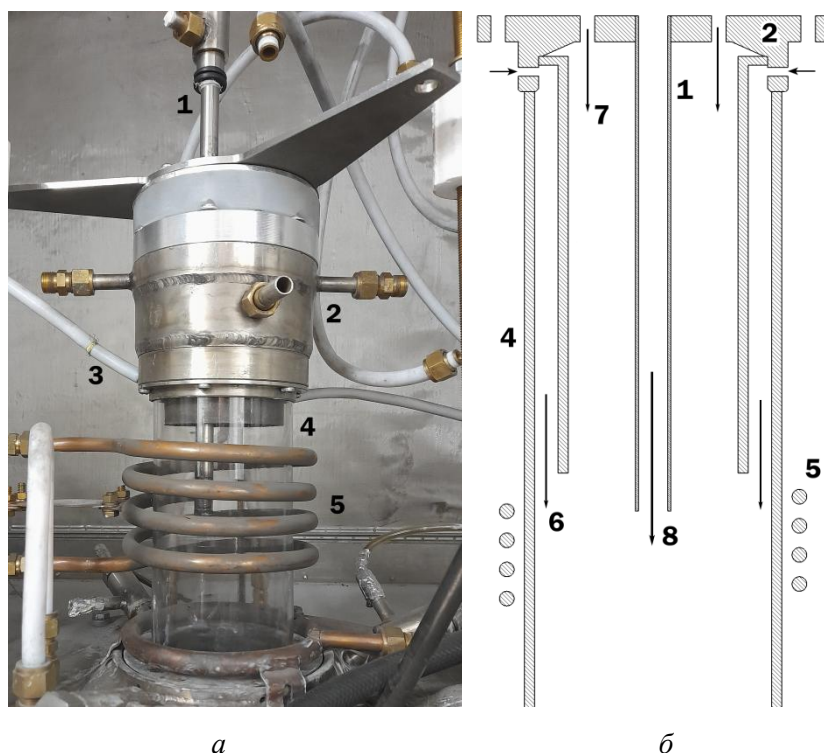


Рис. 1. Высокочастотный индукционный плазмотрон (а); схема движения потоков газа (б):

- 1 – порошковый зонд; 2 – газоформирователь; 3 – поджигающий электрод; 4 – кварцевая колба;
- 5 – медный индуктор; 6 – защитный газ, 7 – плазмообразующий газ, 8 – газопорошковая смесь

В рамках настоящей работы была проведена обработка порошка Inconel 718 фракцией 20–63 мкм. Inconel – семейство жаропрочных высококачественных никель-хромовых сплавов. Материалы подобной марки часто применяются для выпуска изделий, предназначенных для эксплуатации при температурных режимах до 1000 градусов по Цельсию и в химически агрессивных средах. При этом Inconel сохраняет свои прочностные характеристики при большем диапазоне температур, нежели сталь или алюминий.

Таблица 1

Параметры обработки порошка

Мощность, кВт	Расход Ar ₃ , л/мин	Расход Ar _п , л/мин	Расход Ar _г , л/мин	Расход порошка, г/мин
20	55	28	4	7

Одно из основных преимуществ сплава Inconel 718 – его высокая прочность на разрыв при температурах до 700 градусов по Цельсию и коррозионная стойкость на местах сварных соединений, что связано с повышенным содержанием хрома и молибдена. В табл. 2 приведен химический состав исходного порошка Inconel 718.

Таблица 2

Химический состав порошка

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Mn	C	Si	Fe
50,0-55,0	17,0-21,0	4,75-5,5	2,8-3,3	0,65-1,15	0,2-0,8	<1,0	<0,35	<0,08	<0,35	остаток

Перед плазменной обработкой было проведено исследование степени сферичности исходного порошка. Измерение степени сферичности производилось посредством цифровой обработки изображений частиц порошка, полученных на прямом металлографическом микроскопе, в программном пакете MATLAB. Сферичность определялась на 200 частицах, отснятых на контрастном фоне в положении наибольшей устойчивости при помощи микроскопа Carl Zeiss Stemi 2000-C. Суть автоматического метода определения сферичности отдельно взятых частиц заключается в следующем: снимки частиц исходного порошка загружались в рабочую среду MATLAB (рис. 2). При помощи пакета Image Processing Toolbox происходило распознавание контура частиц. Для каждой частицы проводился расчет площади наблюдаемой двумерной поверхности S . В свою очередь, вокруг нее описывалась окружность площадью $S_{окр}$. Степень сферичности C_{ir} вычислялась отношением этих площадей:

$$C_{ir} = \frac{S}{S_{окр}}. \quad (1)$$

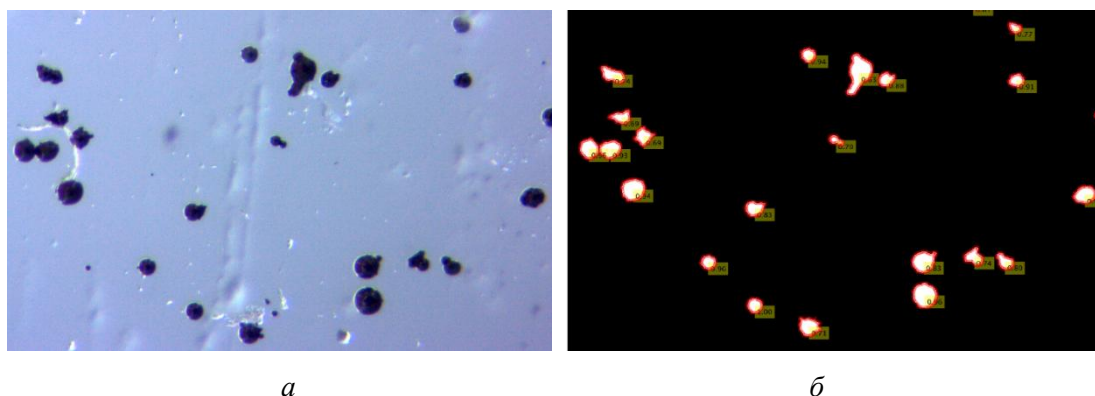


Рис. 2. Контрастное изображение необработанных частиц под микроскопом (а); изображение после обработки в программе (б)

Соответственно, степень сферичности изменяется от 0 до 1, причем частицы, морфологически более похожие на идеальную окружность, будут иметь сферичность, близкую к 1. После плазменной обработки с вышеприведенными параметрами производился повторный анализ степени сферичности (рис. 3). На рис. 4 представлена частотная гистограмма распределения степени сферичности по итогам анализа изображений.

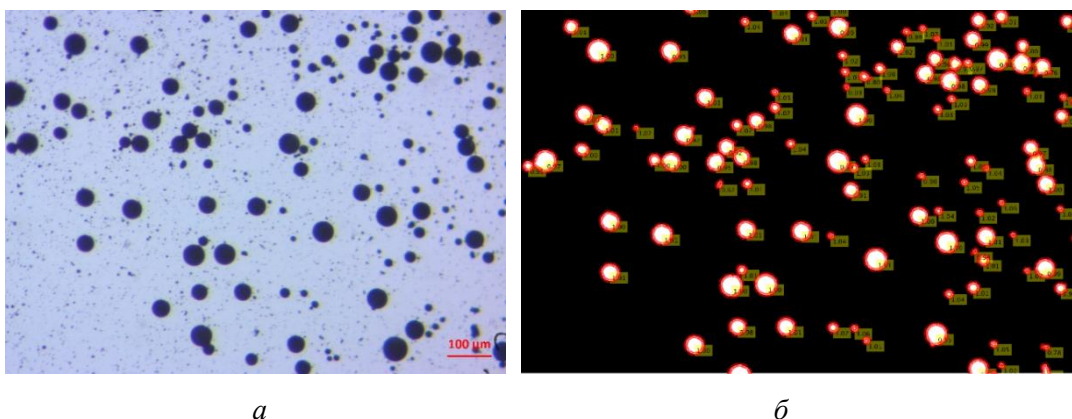


Рис. 3. Контрастное изображение обработанных частиц под микроскопом (а); изображение после обработки в программе (б)

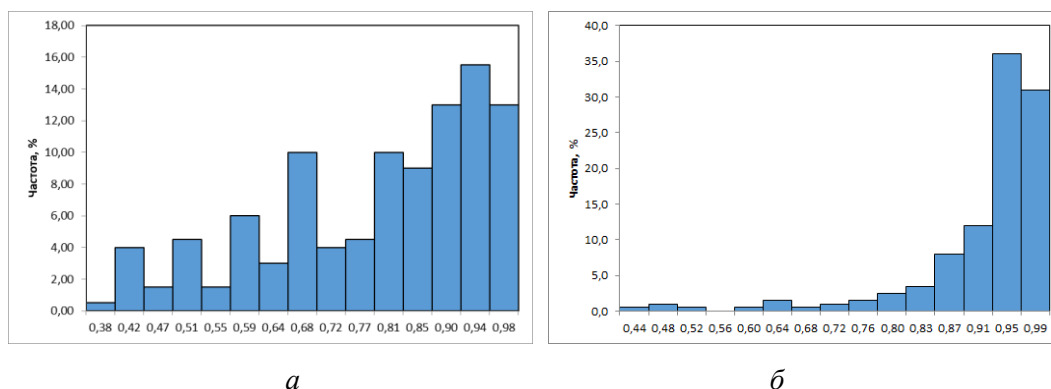


Рис. 4. Частотное распределение степени сферичности частиц до (а) и после (б) обработки

Внешний вид частиц до и после обработки, полученный на прямом металлографическом микроскопе, представлен на рис. 5. Хорошо заметно, что до обработки среди частиц присутствуют такие морфологические дефекты, как удлинения, неправильная форма, сателлиты, а также присутствуют агломераты частиц. После обработки частицы принимают правильную сферическую форму, устраняются дефекты, выравнивается фракционный состав.

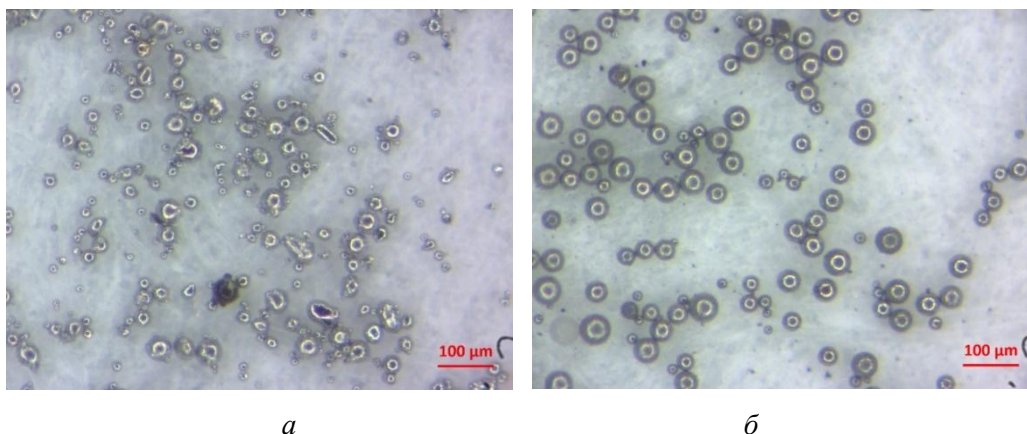


Рис. 5. Внешний вид порошка Inconel 718 до (а) и после (б) обработки

В результате проведенного исследования обнаружены положительные эффекты обработки порошка в индуктивно связанной плазме. Значительно выросла степень сферичности и уменьшилась частота поверхностных дефектов. Перспективой данной работы является исследование влияния плазменной обработки на другие технологические свойства: насыпную плотность, текучесть, гранулометрический состав порошка. Кроме того, планируется провести анализ различных режимов обработки для усиления положительной динамики при обработке порошка Inconel 718 в индуктивно связанной плазме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Popovich A.A. Additive Technologies as Breakthrough Solutions for Creating Advanced Functional Materials // *Metal Science and Heat Treatment*. 2020. Vol. 62. Pp. 18–24. DOI: 10.1007/s11041-020-00507-2.
2. Mechanical properties prediction of the materials gained by combining additive technologies / A. Orlov, D. Masaylo, S. Igoshin, N. Razumov, A. Popovich // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 30(3). Pp. 752–755. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.559.
3. Modeling and analysis of the plasma primary atomization for controllable preparation of high-quality spherical metal powders / Q. Zhang, D. Yu, P. Zhang, Y. Shen, J. Liu, Y. Xiao // *Journal of Materials Processing Technology*. 2022. Vol. 309. 117753. DOI: 10.1016/j.jmatprotec. 2022.117753.
4. Плазменная металлургия. Низкотемпературная плазма. Т. 8. / Ю.В. Цветков, А.В. Николаев, С.А. Панфилов и др. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1992. 265 с.
5. An experimentally verified three-dimensional non-stationary fluid model of unloaded atmospheric pressure inductively coupled plasmas / I. Tsvil'skiy, A. Gilmutdinov, S. Nikiforov, R. Rublya, B. Khamidullin, A. Melnikov, K. Nagulin // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. Vol. 53. 455203. DOI: 10.1088/1361-6463/aba45f.

О НЕКОТОРЫХ ПРИЧИНАХ РАССЛОЕНИЙ В ЛЕНТАХ ИЗ СПЛАВА 42НХТЮ

Головкин П.А., к.т.н., начальник лаборатории входного контроля материалов

АО «Плутон», г. Москва, Российская Федерация
E-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru

Рассматриваются возможные причины нарушения вакуумной плотности сильфонов и других изделий из ленты прецизионного сплава с заданными значениями упругости 42НХТЮ. Установлено, что причиной появления нарушающих вакуумную плотность деталей расслоений в ленте может стать неправильное приготовление исходного расплава будущего прокатываемого слитка.

Ключевые слова: сплав, сильфоны, индукционная плавка, магнитная восприимчивость, слиток, гомогенизация, прокатка, диффузия, расслоения, вакуумная плотность

ABOUT SOME CAUSES OF DELIMITATIONS IN 42NKhTYU ALLOY RIBBONS

Golovkin P.A., PhD in Engineering Sciences, Head of Laboratory for Incoming Materials Control

JSC "Pluton", Moscow, Russian Federation
E-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru

Possible causes of vacuum density violation of bellows and other products made of precision alloy tape with specified elasticity values of Fe-42Ni-5,5Xr-2,7Ti-0,7 are considered. It is established that the reason for the appearance of delaminations in the strip violating the vacuum density of the parts may be the improper preparation of the initial melt of the future rolled ingot.

Keywords: alloy, bellows, induction melting, magnetic susceptibility, ingot, homogenisation, rolling, diffusion, delaminations, vacuum density

Дисперсионно твердеющий сплав 42НХТЮ, входящий в группу сплавов с заданными свойствами упругости по ГОСТ 10994-74 [1], в виде холоднокатаных лент по требованиям ГОСТ 14117 [2] находит применение в различных деталях приборов, от которых требуется низкий температурный коэффициент модуля упругости при температурах до 100 °С. В ряде случаев изготавливаемые детали должны не только соответствовать заложенному в этих документах сочетанию механических свойств, но и обеспечивать вакуумную плотность, необходимую для их использования в качестве сильфонов [3] электровакуумных приборов (ЭВП) и других изделий новой техники. В таком случае к материалу ленты должны предъявляться дополнительные требования, которых нет в ГОСТ 14117, а также в ГОСТ 14080 [4], определяющем технические условия на ленты из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. В частности, в материале лент совершенно недопустимы трещины и расслоения, которые могут привести к потере вакуумной плотности получаемых из ленты деталей ЭВП.

Химический состав сплава 42НХТЮ в соответствии с ГОСТ 10994 приведен в табл. 1. Вид расслоений на поперечном шлифе отожженной холоднокатаной ленты толщиной 1 мм с увеличением 100[×], 200[×] и 400[×] представлен на фотографиях рис. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава 42НХТЮ, %_{масс.} в соответствии с ГОСТ 10994

Железо	Никель	Алюминий	Углерод	Кремний	Марганец	Титан
Основа	41,5–43,5	0,5–1,0	≤ 0,05	0,5–0,8	0,5–0,8	2,4–3,0

Хром	Сера	Фосфор	Азот	Кислород	Водород	Σ примесей
5,3–5,9	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,01	≤ 0,008	≤ 0,001	Не установлена
			Для металла вакуумной плавки			

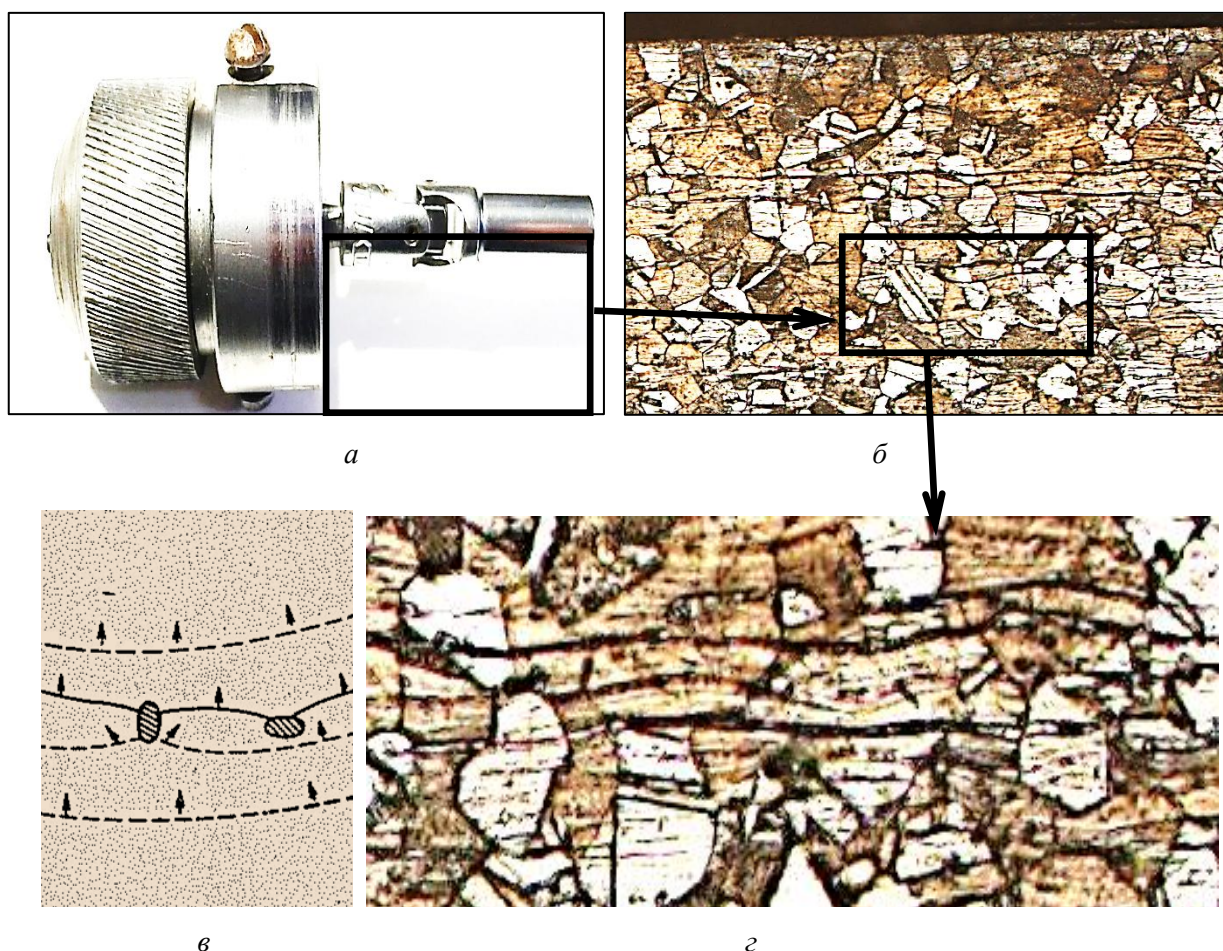


Рис. 1. Расслоения в поперечном сечении ленты из сплава 42НХТЮ, 100[×] (а), 200[×] (б) и 400[×] (с), и схема перемещения диффузионных пор в материале при его нагреве (д)

Видно, что расслоения волнообразны и имеют множественный характер, а кроме того, не совпадают с местами наибольших достигнутых при прокатке деформаций, и заполнены выделившимися при отжиге материала микроскопическими зернами. На рис. 1, д показана и взятая из источника [5] схема перемещения в материале диффузионных пор, физический смысл чего будет пояснен далее. Если бы эти расслоения были следствием попадания в материал ленты мест усадочной пористости или прибыльной части слитка, то они находились бы в центральной области поперечного сечения ленты, а ее материал был бы зашлакован, как это описано в работе [6] для сплава 29НК-ВИ, однако этого мы не наблюдаем. Значит, причина появления расслоений в материале ленты может носить другой характер. В этой связи следует отметить, что лишь для некоторых сплавов из перечня ГОСТ 10994 способ получения указан непосредственно в их буквенно-цифровом обозначении, как, например, для сплава 29НК-ВИ. Но для сплава 42НХТЮ и многих других способ выплавки в их обозначении не указан, и формально поставщик может производить ее самыми разными способами.

Важно отметить следующее: в то время как для сильфонов из близкого по назначению и химическому составу сплава 36НХТЮ, ГОСТ 21482 [7] предусматривает использование только материала электрошлакового переплава либо обычной дуговой плавки 36НХТЮ-Ш

и 36НХТЮ-ОДП соответственно, то упоминание сплава 42НХТЮ там отсутствует. То же касается и ГОСТ 22388 [8], в котором не прописаны способы выплавки материалов для изготовления сильфонов и где сплав 42НХТЮ также не упоминается, что позволяет производителям сильфонов использовать для их изготовления материал не только электрошлакового переплава и обычной дуговой, но и индукционной плавки. Так, исследуемый материал, требования к которому согласно ГОСТ 10994 не предусматривают вакуумной индукционной плавки, был изготовлен именно этим способом в плавильном устройстве с технологической загрузкой 100 кг шихты.

Поскольку индукционная плавка основана на разогреве шихты мощными электромагнитными полями, этот момент следует учитывать при построении технологии приготовления исходного расплава. Согласно принятой в настоящее время теории ближнего поля, даже расплавленный металл сохраняет ближний порядок объединенных в микрообласти атомов, ослабляющийся по мере его перегрева [9]. Такое представление объясняет малое значение изменения магнитной восприимчивости материала при плавлении, проявляющееся в виде так называемого сдвига Найта [9]. Так, для железа изменение составляет всего около 2–3 %, по сути, находясь в пределах погрешности измерений [10]. Поскольку компоненты сплава отличаются различной электромагнитной восприимчивостью, они могут быть разделены в тигле по этому показателю, как это описано в работе [6], что нарушит идеальное теоретическое их распределение в расплаве, которое предполагается исходя из их диаграмм состояния.

При том, что электромагнитная восприимчивость даже расплавленных железа и никеля сильно разнится, в составе сплава 42НХТЮ имеются и парамагнитные составляющие – хром, титан и другие. С учетом наибольшего содержания компонентов очень важным становится тот факт, что в промежутке температур приготовления расплава (порядка 1550–1600 °С) этот показатель у никеля примерно вчетверо выше, чем у железа, составляя около $2,2 \cdot 10^9 / 4\pi \cdot \text{моль/м}^3$ и $4,0 \cdot 10^8 / 4\pi \cdot \text{моль/м}^3$ соответственно [10]. Поэтому при прочих равных условиях никель будет сильнее притягиваться к центру расплава, отесняя менее восприимчивые к магнитным воздействиям компоненты к его краям и частично разделяя их. Взятые из источника [11] картины круговорота расплава в тигле при работе обычных индукторов и его управляемого перемещения электромагнитными полями представлены на рис. 2. Здесь цифрами обозначены: 1 – расплав, 2 – тигель, и 3 – индуктор.

Поскольку микроструктура ленты не показывает своей зашлакованности, а только наличие микроскопических расслоений, мы можем опустить в данной статье описание влияния перемещения расплава в тигле на его очищение от газовых и прочих примесей и остановиться только на связи электромагнитной восприимчивости компонентов расплава и химической неоднородности материала получаемого слитка.

Показанные на рис. 2 схемы соответствуют перемещению однородного расплава либо расплава с очень близкими значениями электромагнитной восприимчивости его компонентов, в противном случае перемещение многокомпонентного расплава сильно усложнится. Так, на схеме видно, что под действием двухфазного поля, образуемого при работе обычных печных индукторов, расплав в тигле разделяется на две не смешивающиеся между собой части, и помимо указанного разделения каждая из несмешивающихся областей расплава будет также разделяться на части с большим или меньшим содержанием более или менее восприимчивых к электромагнитным воздействиям веществ.

Поэтому при отсутствии в печи специальных устройств для управляемого перемешивания расплава в тигле эта неравномерность может перейти в материал получаемого слитка. Простой способ уравновесить разделенные по признаку электромагнитной восприимчивости компоненты расплава заключается в его выдержке без воздействия электромагнитных полей при подстуживании. Подстуживание применяется в основном для резкого охлаждения расплава в тигле и осуществляется в его очистке от газов и других примесей при снижении их предельной растворимости с понижением температуры [12]. Хотя тепловое конвективное перемещение расплава чистого железа для плавки массой выхода 70 кг при температуре 1600 °С примерно в три раза меньше скорости перемещения при воздействии обычного

двухфазного индуктора [13], практика показывает, что для выравнивания химического состава плавки массой до 200 кг в тигле обычно достаточно 6–7 минут.

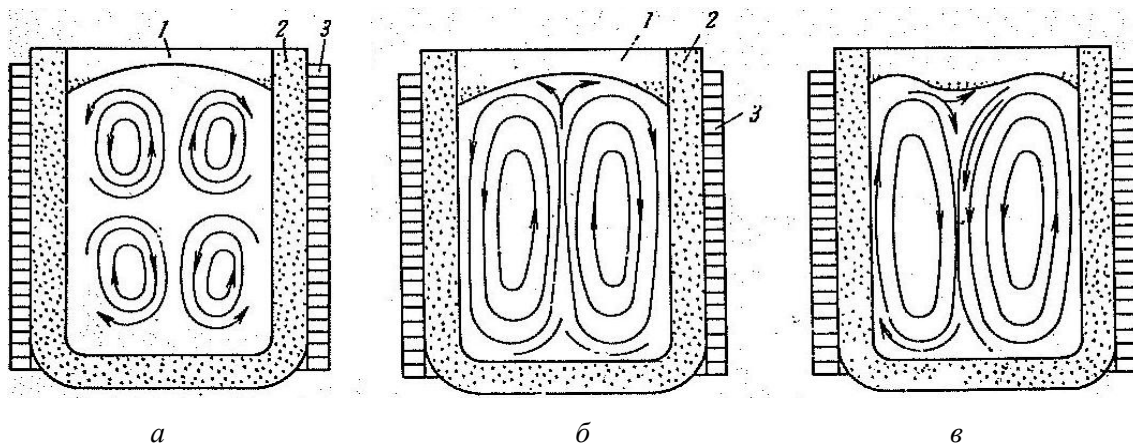


Рис. 2. Естественные потоки расплава (а) и его движение под действием двухфазного поля, переходящего сверху вниз (б) и снизу вверх (в)

После того как корочка застывающего шлака покрывает до 2/3 зеркала расплава, индуктор печи включают на необходимую мощность для дальнейшего нагрева расплава либо сливают расплав в изложницу. Следующим неперенным шагом в получении однородной структуры материала должна стать выравнивающая его химический состав термическая обработка в виде гомогенизирующего отжига. Однако некоторые производители материалов не считают проведение гомогенизации слитка обязательным, и, как следствие, та взаимная диффузия компонентов, которая должна была бы произойти во время такого отжига слитка, происходит во время его нагрева под прокатку и при самой прокатке, приводя к возникновению в материале расслоений диффузионного происхождения, как это на примере сплава 29НК-ВИ описано в работе [6]. Диффузионные свойства железа и никеля как основных составляющих сплава 42НХТЮ в отрезке температур его горячей деформации приведены в табл. 2 [10].

Таблица 2

Основные диффузионные свойства железа и никеля

Вещество	Температура, °С	Фактор самодиффузии D_0 , см ² /с	Энергия активации самодиффузии Q , КДж/моль
γ-железо	1077–1227	1,1	284
Никель	1027–1427	1,9	285

Из табл. 2 следует, что энергия активации самодиффузии Q железа и никеля при температурах его отжига,ковки и горячей прокатки сплава очень близки, а вот значение фактора самодиффузии D_0 у железа почти вдвое ниже, чем у никеля. Это значит, что при нагреве и прокатке слитка и получаемых заготовок будет происходить проникновение никеля в железо. В соответствии с принципом Ле-Шателье дополнительно усиливает диффузию никеля в железо при горячей прокатке их магнитострикция, проявляющаяся в резком относительном изменении объема материала, данные по влиянию которой на их ТКЛР отражены в ГОСТ Р 8.992 [14]. В свою очередь опережающая диффузия вызовет в материале заготовки диффузионный фронт, по мере продвижения которого в соответствии с эффектом Френкеля [5, 12] будет происходить возникновение и рост диффузионных пор, в своем множестве образующих расслоения.

Таким образом, расслоения в лентах являются физическим отражением линии Матано [12] как неравномерности взаимной диффузии компонентов материала. Следует отметить наличие в структуре материала отожженных холоднокатаных лент тонких прослоек в виде зерен, расположенных в пространстве диффузионных расслоений, хорошо различимых на фотографии рис. 1, 2. Эти зерна являются следствием рекристаллизации вещества, поступившего на границу

диффузионного расслоения, и являются физическим проявлением выступающего в паре с эффектом Френкеля эффекта Киркендалла [5, 12]. Здесь следует вернуться к представленной ранее схеме на рис. 1, в, описывающей перемещение в материале заготовки фронтов диффузионных пор, выводящих в область расслоений все новые порции вещества. Эти расслоения уже не могут быть залечены при холодной прокатке ленты, поскольку скорость диффузионных взаимодействий при холодной прокатке много меньше, чем при горячей.

Описанные «шагающие» расслоения свойственны разным материалам с неравновесным химическим составом, что применительно к сплаву 29НК-ВИ описано в работе [6]. Особая опасность таких расслоений состоит в том, что они могут перемещаться в объеме материала уже после того, как он был прокатан в ленту и отожжен. Такое перемещение может происходить и далее в материале полученных из ленты деталей при технологических и эксплуатационных нагревах и приводит к нарушению вакуумной плотности и выходу ЭВП из строя. В то же время выравнивание химического состава исходного расплава и отжиг слитка позволяют получить качественный материал холоднокатаных лент без признаков диффузионных расслоений.

Выводы

1. При отсутствии в конструкции индукционной печи специальных индукторов с возможностью управляемого перемещения расплава различная электромагнитная восприимчивость входящих в состав сплава 42НХТЮ компонентов может привести к их разделению по этому признаку в общем объеме расплава.

2. Разделенный по признаку электромагнитной восприимчивости материал слитка из сплава 42НХТЮ склонен к опережающей диффузии его никелевой составляющей в железистую. Как следствие возникающих фронтов опережающей диффузии, в металлическом материале по механизму Френкеля возникают диффузионные расслоения, на поверхности которых из привнесенного вещества по механизму Киркендалла образуются новые зерна.

3. В соответствии с принципом Ле-Шателье магнитострикция составляющих материал заготовки компонентов при температурах ее горячей прокатки дополнительно усиливает процесс неравномерной диффузии и вызываемые ею последствия.

4. Особенностью прокатки ленты в станах типа дуо или кватро является необходимость нагрева заготовок перед каждым технологическим проходом. Образующие в таких условиях «шагающие» диффузионные расслоения представляют повышенную опасность для вакуумной плотности получаемых холоднокатаных лент и изготавливаемых из них деталей.

5. Для достижения необходимого выравнивания химического состава плавки массой выхода до 200 кг необходима выдержка расплава в условиях прекращения или значительного ослабления на него электромагнитного воздействия в течение не менее 6–7 минут, обычно проводимая в рамках его подстуживания для очищения от примесей.

6. Для исключения диффузионных расслоений в лентах из сплава 42НХТЮ исходный для ее изготовления слиток должен быть гомогенизирован по установленным режимам.

7. Получение химически однородного материала заготовок исключает образование в них расслоений диффузионного происхождения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки. М.: Издательство стандартов, 1978. 17 с., изм.
2. ГОСТ 14117-85. Лента из прецизионных сплавов для упругих элементов. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1986. 11 с., изм.
3. Сильфоны. Расчет и проектирование / Л.Е. Андреева, А.И. Беседа, Ю.А. Богданова и др.; под ред. Л.Е. Андреевой. М.: Машиностроение, 1975. 159 с.
4. ГОСТ 14080-78. Лента из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1978. 17 с., изм.
5. Чалмерс Б. Физическое металловедение / Пер. с англ. В.А. Алексеева и В.К. Григоровича; под ред. А.К. Натансона. М.: Металлургиздат, 1963. 456 с.

6. Головкин П.А. О важности проведения подстуживания расплава при индукционной плавке и гомогенизации слитка под прокатку листов и лент из прецизионного сплава 29НК-ВИ / Вакуумная техника и технологии – 2023: Тр. 30-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 20–22 июня 2023 г. СПб.: ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева, 2023. С. 72–78.
7. ГОСТ 21482-76. Сильфоны однослойные измерительные металлические. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1987. 76 с., изм.
8. ГОСТ 22388-90. Сильфоны однослойные диаметром до 200 мм. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1994. 44 с., изм.
9. Вилсон Д.Р. Структура жидких металлов и сплавов / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1972. 247 с.
10. Физические величины. Справочник / Коллектив авторов под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.
11. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. М.: Металлургия, 1975. 224 с.
12. Мальцева Л.А., Гервасьев М.А., Кутьин А.Б. Материаловедение: учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. 339 с.
13. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. 2. Основы и технология ковшовой металлургии / Пер. с нем. Г.Н. Еланского. М.: Металлургия, 1984. 414 с.
14. ГОСТ Р 8.992-2020. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные справочные данные. Армко железо. Никель. Температурный коэффициент линейного расширения и удельное электрическое сопротивление в диапазоне температур от 300 К до 1000 К. М.: Стандартиформ, 2020. 20 с.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ КОМПОЗИЦИИ AlN-SiC МЕТОДОМ АЗИДНОГО СВС

Гудиминко З.А., студент, Титова Ю.В., доцент, к.т.н., доцент, Уварова И.А., аспирант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: gudiminko00@mail.ru

Показана перспектива использования нитрид-карбидной композиции AlN-SiC, выбрана методика получения композиции. Приведены результаты исследования возможности применения метода азидного СВС для получения высокодисперсной порошковой композиции AlN-SiC с использованием галоидной соли C₂F₄. Проведен термодинамический, рентгенофазовый, микроструктурный и энергодисперсионный анализ синтезированных продуктов. Установлено, что использование исходных смесей «Al-Si-(NH₄)₃AlF₆-C₂F₄» обеспечивает получение композиций керамических высокодисперсных порошков AlN-SiC методом азидного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Ключевые слова: азид натрия, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, горение, нитрид алюминия, карбид кремния

OBTAINING HIGHLY DISPERSE CERAMIC COMPOSITION AlN-SiC BY AZIDE SHS METHOD

Gudiminko Z.A., student, Titova Yu.V., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Uvarova I.A., PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: gudiminko00@mail.ru

The prospect of using the nitride-carbide composition AlN-SiC, chosen by the method of obtaining the composition, is shown. The results of a study of the possibility of using the azide SHS method to obtain a high-dispersity AlN-SiC powder composition using the halide salt C₂F₄ are presented. Thermodynamic, X-ray diffraction, microstructural and energy dispersive analysis of the synthesized products was carried out. It has been established that the use of initial mixtures “Al-Si-(NH₄)₃AlF₆-C₂F₄” ensures the production of compositions of ceramic highly dispersed AlN-SiC powders by azide self-propagating high-temperature synthesis (SHS).

Keywords: sodium azide, self-propagating high-temperature synthesis, combustion, aluminum nitride, silicon carbide

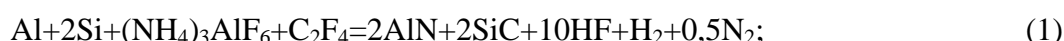
Разработка новых материалов с программируемыми свойствами способствует развитию индустрии наноматериалов. Нитриды и карбиды материалов обладают спектром хороших свойств, однако бывают недостаточно эффективны. Они весьма хрупки, плохо спекаются, а технологический процесс сопровождается большими затратами и невысокой степенью чистоты материала.

Поэтому особый интерес направлен на создание многокомпонентной керамики. Объектом исследования выбран материал AlN-SiC, который, согласно теоретическим данным, обладает высокой коррозионной стойкостью, высокой термостойкостью и низким электросопротивлением. Известны следующие способы получения порошка целевого композита: холодное и горячее прессование [1], спекание под давлением и без давления [2], метод гел-лития, а также синтез сжиганием [3]. Однако эти способы характеризуются сложным и дорогостоящим оборудованием, наличием большого количества примесей конечного продукта, а также большой длительностью процесса получения материала. Наиболее перспективной является технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [4] для получения высокодисперсной керамической композиции AlN-SiC.

SiC обладает высокой твердостью, устойчивостью к высоким температурам и излучениям, что делает его подходящим материалом для электронных и оптоэлектронных устройств. AlN также является материалом с достаточно высокой твердостью, высоким удельным электрическим сопротивлением, отличной теплопроводностью и устойчивостью к высоким температурам и агрессивным средам [5]. В результате получается материал с высоким сопротивлением и прочностью на разрыв, хорошей термической проводимостью и сопротивлением износу, а также низким коэффициентом теплового расширения. С помощью данного метода возможно получение целевой композиции, используя метод азидного СВС.

Из-за простоты технологии и оборудования нанопорошки марки СВС-Аз могут быть в два-три раза дешевле аналогичных нанопорошков плазмохимического синтеза. Нанопорошковая продукция азидной технологии СВС весьма перспективна для модифицирования алюминиевых сплавов.

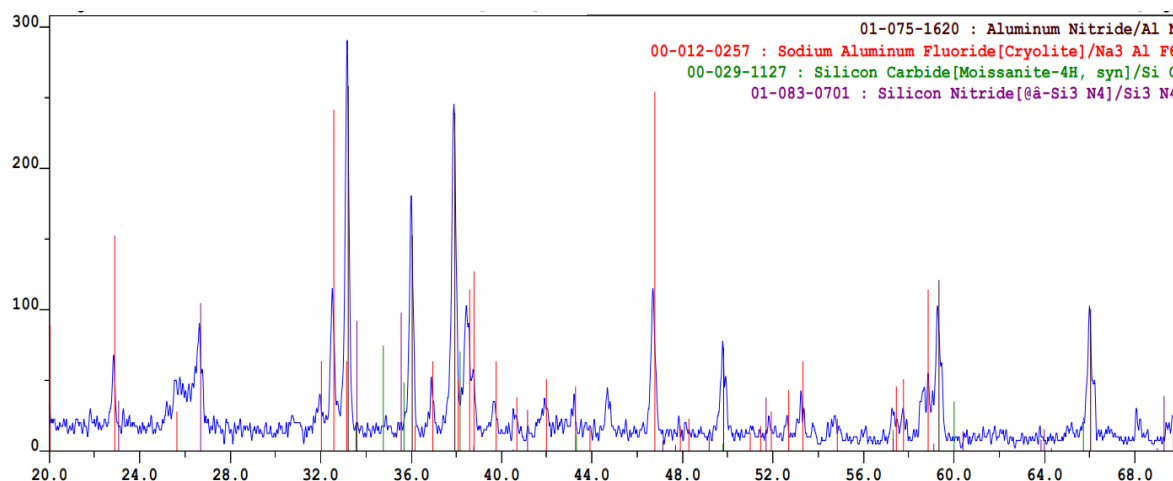
В ходе данной работы были рассмотрены следующие уравнения химической реакции системы Al-Si-(NH₄)₃AlF₆-C₂F₄:



Термодинамический анализ системы показал возможность получения композиции AlN-SiC. В лабораторном реакторе СВС-Аз (объем 4,5 л) были зарегистрированы температуры и скорости горения. Проанализировав микроструктуру, проведя рентгенофазовый и энергодисперсионный анализ, мы сделали вывод о том, что полученный продукт горения представляет собой частицы, близкие к сферической и шестиугольной форме с размерами от 100 до 400 нм.

На рисунке показана рентгенограмма системы Al-Si-(NH₄)₃AlF₆-C₂F₄.

В результате были обнаружены четыре фазы: преимущественное количество нитрида алюминия (AlN), карбида кремния (SiC) и небольшое количество криолита (Na₃AlF₆) и нитрида кремния (Si₃N₄). Таким образом, система Al-Si-(NH₄)₃AlF₆-C₂F₄ позволяет получить керамическую композицию AlN-SiC методом азидного СВС.



Рентгенограмма промытых продуктов системы Al-Si-(NH₄)₃AlF₆-C₂F₄

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yanping Lu, Xiangrong Zang, Bin Du. Investigation of the effect of the SiC particle size on the properties of the AlN–SiC composite ceramic // *Materials Chemistry and Physics*. 2021. 261. P. 1242222.
2. Fabrication of novel AlN-SiC-C refractories by nitrogen gas-pressure sintering of Al_4SiC_4 / Xinxin Wu, Chengji Deng, Jinghui Di, Jun Ding, Hongxi Zhu, Chao Yu // *Journal of the European Ceramic Society*. 2022. 42. Pp. 3634–3643.
3. Амосов А.П., Бичуров Г.В. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов. М.: Машиностроение-1, 2007. 526 с.
4. Самсонов Г.В., Кулик О.П., Полищук В.С. Получение и методы анализа нитридов. Киев: Наукова думка, 1978. 320 с.
5. Characterizing SiC-AlN semiconductor solid solutions with indirect and direct bandgaps a Brno University of Technology / Dinara Dallaeva, Shikhgasan Ramazanov, Gusejn Ramazanov, Ramazan Akhmedov, Pavel Tománka // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2015. Vol. 9450.

РЕЦИКЛИНГ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Гусев В.Д.^{1,2}, инженер-технолог, магистр, Баранов Д.А.¹, к.т.н.,
Щедрин Е.Ю.¹, главный металлург, Гусев О.Н.¹, заместитель директора по персоналу,
Жаткин С.С.², к.т.н.

¹ ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: viktor2099@bk.ru

Представлены результаты исследования структуры и механических свойств образцов из жаропрочного никелевого сплава ЭП648, изготовленных методом прямого лазерного выращивания с использованием первичной и вторичной металлопорошковой композиции.

Ключевые слова: исследование структуры, жаропрочный никелевый сплав, прямое лазерное выращивание

PROCESSING OF METAL POWDER COMPOSITIONS IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF DIRECT LASER GROWING OF BLANKS FOR INDUSTRIAL ENGINES

Gusev V.D.^{1,2}, process engineer, Master, Baranov D.A.¹, PhD in Engineering Sciences,
Shchedrin E.Yu.¹, chief metallurgist, Gusev O.N.¹, Deputy Director for HR,
Zhatkin S.S.², PhD in Engineering Sciences

¹ PJSC "ODK-Kuznetsov", Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: viktor2099@bk.ru

The results of the study of the structure and mechanical properties of heat-resistant nickel alloy samples made by direct laser cultivation using primary and secondary metal powder compositions are presented.

Keywords: structure research, heat-resistant nickel alloy, direct laser cultivation

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в авиации, морском и промышленном транспорте, энергетике. Они характеризуются высокой технической сложностью и требуют использования специальных материалов и технологий для изготовления ключевых деталей, включая крупногабаритные корпусные детали ГТД.

Одной из основных проблем в производстве крупногабаритных корпусных деталей ГТД традиционными способами является разноструктурность и анизотропия свойств материалов, получаемых в результате применения различных технологий изготовления, например литья, проката и сварки [1]. В связи с этим все большую актуальность в процессе производства крупногабаритных деталей приобретают аддитивные технологии, способные применять сложнолегированные сплавы с высокими жаропрочными и жаростойкими характеристиками. Технологии аддитивного производства способны решить и ряд других задач: снижение сроков и затрат на производство деталей сборочной единицы (ДСЕ), повышение точности и возможность создания ДСЕ сложной геометрии.

Одним из инновационных методов аддитивных технологий является прямое лазерное выращивание (ПЛВ). Особенностью данного метода является подвод энергии и материала непосредственно к зоне построения. Основным расходным материалом являются металлопорошковые композиции (МПК) различного химического состава. В зависимости от условий работы и требуемых эксплуатационных характеристик они могут быть на никелевой, кобальтовой и железной основе.

Жаропрочные никелевые сплавы нашли широкое применение в производстве деталей и узлов, работающих длительное время в условиях предельно высоких температур и нагрузок [2]. В процессе ПЛВ коэффициент использования материала (КИМ) достигает 70–80 %, но в связи с особенностями геометрии и режимами выращивания этот коэффициент может быть ниже. Доля порошка, не попавшего в зону наплавки при коаксиальной подаче транспортирующим газом (вторичный порошок), может быть значительной, поэтому вопрос об использовании вторичной МПК при прямом лазерном выращивании весьма актуален.

С учетом вышеизложенного целью данной работы является сравнительное исследование структурообразования жаропрочного никелевого сплава с использованием первичной и вторичной металлопорошковой композиции при прямом лазерном выращивании.

Исследование микроструктуры и механических свойств проводилось на образцах, изготовленных из никелевого жаропрочного сплава ЭП648 (табл. 1) с габаритами 200×100×10 мм (Д×Ш×В).

Металлопорошковые композиции были получены методом газовой атомизации. В исследовании использовали МПК фракцией от 40 до 150 мкм с текучестью не более 27,5 с (ГОСТ 20899) и насыпной плотностью 4,64 г/см³ ±15 % (ГОСТ 19440).

Таблица 1

**Химический состав металлопорошковой композиции
ХН50ВМТЮБ (ЭП648)**

Содержание химических элементов в %													
Cr	Ni	Fe	Al	Ti	Mo	Nb	W	C	S	P	Mn	B	Ce
32,0–35,0	Основа	≤ 4,0	0,5–1,1	0,5–1,1	2,3–3,3	0,5–1,1	4,3–5,3	0,1	0,01	0,015	0,5	0,008	0,03

Выращивание образцов осуществлялось на подложке толщиной 10 мм из материала Ст3 при помощи установки лазерного выращивания (производитель: Россия, г. Санкт-Петербург, ИЛИСТ СПбГМТУ) в соответствии с ранее отработанными режимами для сплава ЭП648 (табл. 2).

Структура материалов и химический состав определялись на растровом электронном микроскопе.

Все исследования проводились в лабораториях ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара), а полученные результаты являются продуктом деятельности предприятия.

Замеры микротвердости осуществлялись согласно ГОСТ 9450-76 методом восстановленного отпечатка четырехгранной пирамидой с квадратным основанием (по Виккерсу).

Таблица 2

Режимы выращивания образцов

Параметр выращивания	Ед. изм.	Значение
Мощность лазерного излучения, P	кВт	2,0
Диаметр пятна лазерного излучения, \varnothing_n	мм	2,59
Скорость наплавки, V_n	мм/с	25
Ширина валика, l_1	мм	2,5
Шаг слоя, h	мм	0,8
Ширина трека, l_2	мм	1,67
Расход порошка	г/мин	21
Расход транспортирующего газа	л/мин	5
Расход газа для обдува защитного стекла	л/мин	5
Расход защитного газа в сопле	л/мин	7

Режимы наплавки подбирались исходя из рекомендаций производителя установки и предшествующих экспериментальных исследований.

При визуальном осмотре макроструктуры образцов, выращенных из первичной МПК, дефектов наплавки, таких как несплавления, поры, трещины, не выявлено (рис. 1). В образцах из вторичной МПК легко различимы поры, возникшие скорее всего по причине насыщения кислородом расплавленного материала вследствие низкой защиты (защитный газ – аргон). Структура матовая с хорошо различимыми сплавленными между собой треками (валиками). Образцы из вторичной МПК обладают схожей структурой (рис. 1).

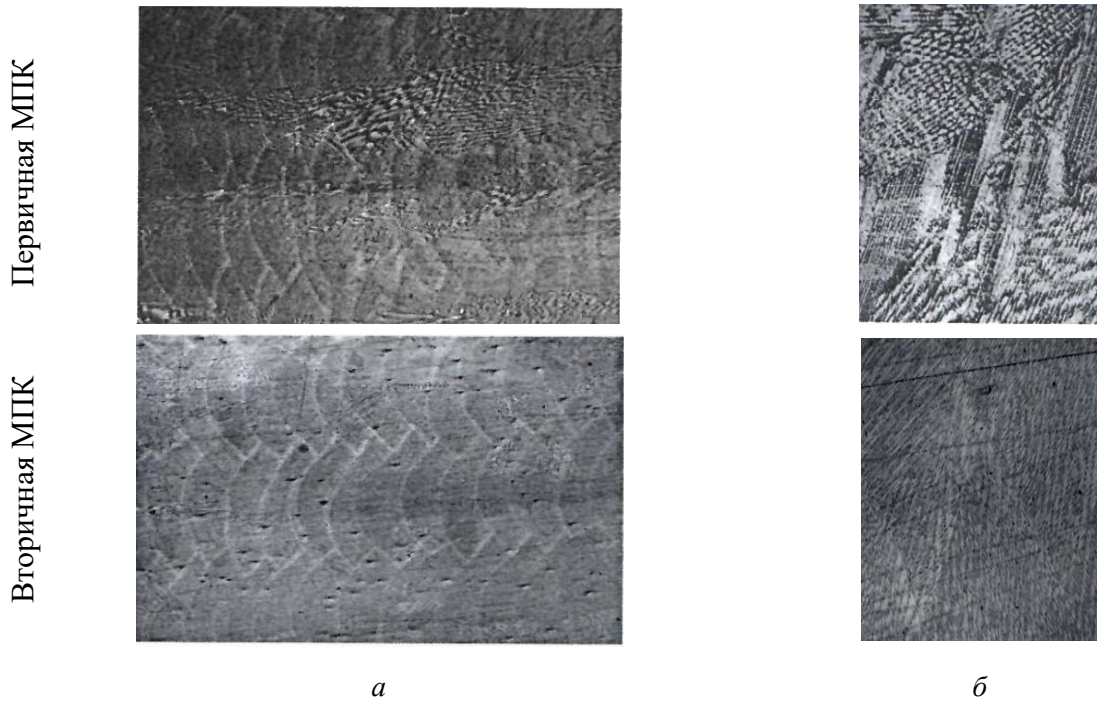


Рис. 1. Макроструктура образцов из сплава ЭП648, $\times 25$:
а – продольный разрез, б – поперечный разрез

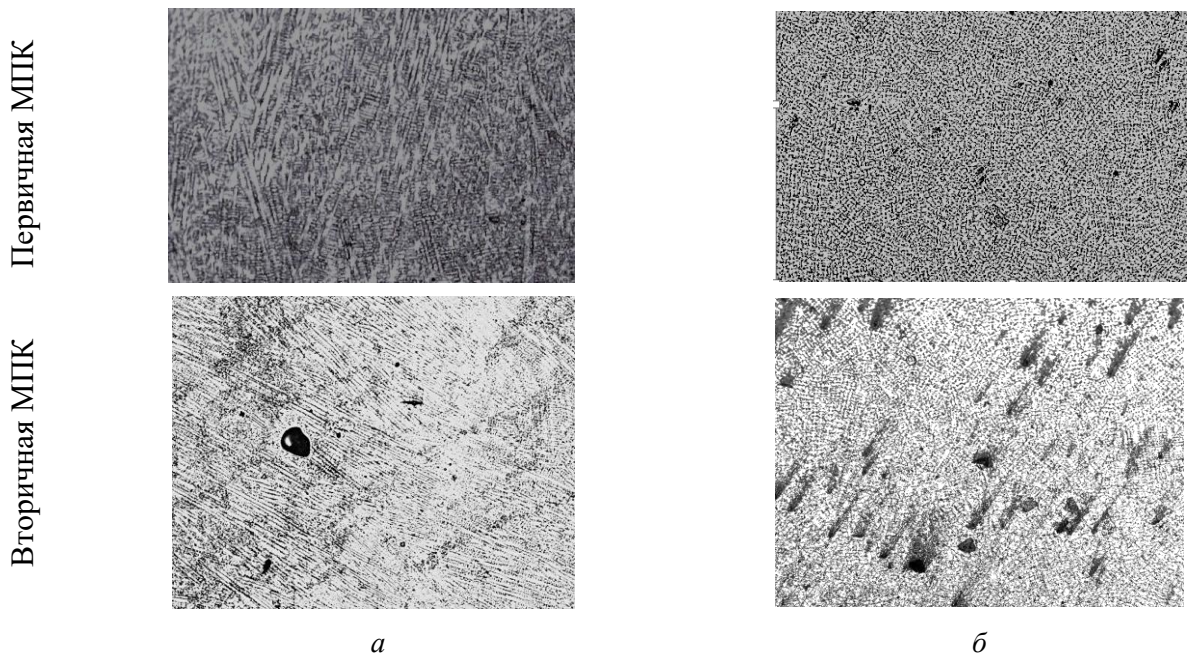


Рис. 2. Микроструктура образцов из сплава ЭП648, $\times 200$:
а – продольный разрез, б – поперечный разрез

Вне зависимости от типа материала (первичная или вторичная МПК) жаропрочного никелевого сплава в процессе прямого лазерного выращивания (ПЛВ) происходит формирование мелкоячеисто-дендритной разнонаправленной структуры аустенитного состава (рис. 2) [3, 4]. При этом в продольном сечении наблюдается формирование игольчатого строения с хаотичным направлением роста кристаллов, а в поперечном сечении – формирование столбчатых дендритов [5, 6]. Сложность внутреннего строения трека связана сразу с несколькими направлениями теплоотвода при его кристаллизации: основной фронт кристаллизации движется за фокусным пятном лазера (теплоотвод вдоль оси движения), другим направлением фронта является теплоотвод в предыдущий слой (обусловлено сильным изгибом профиля наплавляемого валика), что провоцирует зарождение и рост субзерен в других направлениях [7].

При анализе микроструктуры вторичного порошка можно заметить в большом количестве поры разных размеров.

Таблица 3

Химический состав сплава ЭП648, полученного при ПЛВ

МПК	Содержание химических элементов, %										
	Cr	Nb	W	Mo	Al	Mn	Ti	C	S	P	Fe
Первичная	33,5	0,99	4,70	2,71	1,07	0,01	0,94	0,053	0,0059	0,003	0,53
Вторичная	33,4	0,97	4,8	2,72	1,09	0,01	0,92	0,055	0,0057	0,004	0,55

Химический состав образцов, выращенных из вторичной МПК, сопоставим с химическим составом образцов из первичной МПК (табл. 3). Из этого следует, что перераспределение легирующих элементов при термическом воздействии на первичный порошок не происходит.

Полученные прочностные характеристики образцов при комнатной температуре также сопоставимы (табл. 4), что обусловлено формированием идентичной структуры (рис. 1, 2) и отсутствием изменений в химическом составе (см. табл. 4).

Таблица 4

Физико-механические свойства жаропрочного никелевого (ЭП648) сплава при комнатной температуре

МПК	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, МПа	Твердость HRC
Первичная	564–575	833–842	29,2–37,6	29,4–31,1	78–98	23,5
Вторичная	547–569	786–826	28,0–38,4	15,5–29,4	79–85	23,5–24

При высокотемпературных испытаниях на длительную прочность образцы из вторичной МПК в среднем продержались в 1,6 раза меньше по времени, чем из первичной (рис. 3). Одной из причин этого, вероятно, является растворение γ' -фазы при нагреве выше сольвуса, образовавшейся на предыдущих технологических этапах (например, при газовой атомизации или при первичном использовании МПК) [8].

Ограниченная стойкость МПК жаропрочных сплавов к переплаву обусловлена особенностями их химического состава и структуры. Высокий уровень легирования элементами с малым коэффициентом распределения (Ti и Al) приводит при кристаллизации к образованию легкоплавких прослоек по зонам срастания дендритов, что обуславливает потенциаль-

ную склонность наплавленного металла к образованию дефектов кристаллизационно-ликвационной природы и к необратимому снижению жаропрочности [5].

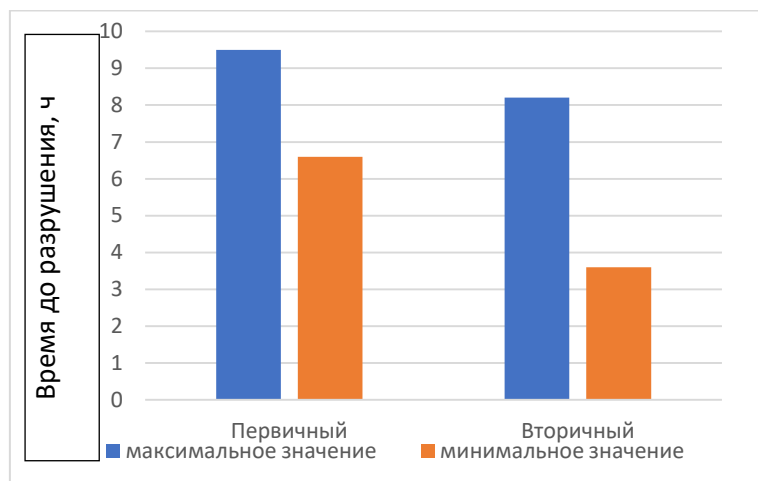


Рис. 3. Длительная прочность жаропрочного никелевого (ЭП648) сплава при повышенной температуре 800 °С с нагрузкой 245 МПа

Выводы

1. Сравнительное исследование химического состава образцов из первичной и вторичной металлопорошковой композиции жаропрочного сплава ЭП648 показало, что перераспределения легирующих элементов в частицах вторичного порошка (в процессе термического воздействия на них при первичном использовании МПК) не происходит.

2. В образцах из первичной и вторичной МПК наблюдается формирование мелкоячеистой дендритной разнонаправленной структуры аустенитного состава. При этом в продольном сечении отмечается формирование игольчатого строения с хаотичным направлением роста кристаллов, а в поперечном сечении – формирование столбчатых дендритов.

3. Длительная прочность образцов из вторичной МПК жаропрочного сплава ЭП648 ниже, чем у образцов из первичной, что, вероятно, обусловлено растворением при нагреве выше сольвуса γ' -фазы, образовавшейся на предыдущих технологических этапах (газовая атомизация МПК).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kovchik A., Babkin K., Vildanov A. Research of deformation compensation method in laser metal deposition process of 316L stainless product // Journal of Physics: Conference Series (10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021), St. Petersburg, 20–22 September, 2021). 2021. Pp.1–7. <https://doi.org/10.1088/1742-65-6596/2077/1/012010>
2. Баранов Д.А. Структура и свойства жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ХН68ВМТЮК при лазерной сварке деталей ГТД: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.17. 2021. 150 с.
3. Балякин А.В., Носова Е.А., Олейник М.А. Влияние термической обработки на структуру и свойства заготовок из жаропрочных никелевых сплавов, полученных по аддитивным технологиям // Вестник Моск. авиац. ин-та. 2023. № 3 (3). С. 209–219.
4. Исследование структуры жаропрочных сплавов при прямом лазерном выращивании / Д.А. Баранов, Е.Ю. Щедрин, С.С. Жаткин, К.В. Никитин // Литье и металлургия. 2023. № 3. С. 16–23. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-16-23>
5. Khakimov A.M., Zhatkin S.S., Nikitin K.V. Investigation of the parameters of direct laser growing and subsequent processing to obtain a defect-free structure of a material made of a heat-resistant EP648 alloy // Journal of Physics: Conference Series (Engineering and Materials Science). 2021. Pp. 305–310. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/4/042037>

6. Baranov D.A., Zatkan S.S., Parkin A.A. Analysis of Defected at Laser Welding of Heat-Resistant Alloy KhN45VMТYuBR. In: Defect and Diffusion Forum ISSN: 1662–9507 (Materials engineering and technologies for Production and Processing VII, Switzerland, 17 august 2021). 2021. Pp.108–114. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.108>
7. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления / Е.Н. Каблов, А.Г. Евгений, О.Г. Оспенникова, Б.И. Семёнов, А.Б. Семёнов, В.А. Королёв // *Авиационная и ракетно-космическая техника*. 2016. № 9. С. 66–67.
8. Волков А.М., Гарибов Г.С. Влияние температурных режимов закалки на структуру и механические свойства дискового гранулируемого жаропрочного сплава. *Технология легких сплавов*. 2013. № 2. С. 51–55.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МАХ-ФАЗ Ti_3SiC_2 И Ti_3AlC_2

Давыдов Д.М., аспирант, Закамов Д.В., доцент, к.т.н.

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: davidovd77@mail.ru

Представлены результаты термодинамического анализа в расчете на получение МАХ-фаз карбосилицида титана Ti_3SiC_2 и карбоалюминиды титана Ti_3AlC_2 из стехиометрической шихты элементарных порошков титана Ti, углерода C, кремния Si и алюминия Al. Термодинамический анализ показал возможность образования МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_2 методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в режиме горения при постоянном давлении и стехиометрическом составе смеси.

Ключевые слова: СВС, термодинамический анализ, МАХ-фазы, Ti_3SiC_2 , Ti_3AlC_2

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE PROCESS OF OBTAINING MAX PHASES Ti_3SiC_2 AND Ti_3AlC_2

Davydov D.M., PhD student, Zakamov D.V., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: davidovd77@mail.ru

The results of thermodynamic analysis are presented for the production of MAX phases of titanium carbosilicide Ti_3SiC_2 and titanium carboaluminide Ti_3AlC_2 from a stoichiometric charge of elemental powders of titanium Ti, carbon C, silicon Si and aluminum Al. Thermodynamic analysis showed the possibility of the formation of MAX phases Ti_3SiC_2 and Ti_3AlC_2 by the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in combustion mode at constant pressure with a stoichiometric mixture composition.

Keywords: SHS, thermodynamic analysis, MAX phases, Ti_3SiC_2 , Ti_3AlC_2

В настоящее время МАХ-фазы карбосилицида титана и карбоалюминиды титана являются привлекательными из-за их уникальных промежуточных свойств между керамическими и металлическими. Они могут быть востребованы в энергетике, машиностроении, авиационной и других отраслях [1]. Для оценки возможности получения карбосилицида титана Ti_3SiC_2 и карбоалюминиды титана Ti_3AlC_2 методом СВС был проведен термодинамический анализ. Уравнения реакции СВС для получения МАХ-фаз карбосилицида и карбоалюминиды титана с использованием элементарных порошков титана Ti, кремния Si, алюминия Al, углерода C: $3Ti+Si+2C = Ti_3SiC_2$ и $3Ti+Al+2C = Ti_3AlC_2$.

Термодинамический анализ возможности синтеза МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_2 проводился с помощью компьютерной программы Thermo.

Возможность прохождения СВС-процесса анализировалась в режиме горения при постоянном давлении и стехиометрическом составе смеси. Получены расчетные адиабатические температуры горения обеих смесей: $T_{ад}Ti_3SiC_2 = 2792$ К и $T_{ад}Ti_3AlC_2 = 2857$ К. Кроме этого определены составы продуктов горения: жидкий расплав Ti-Si и твердая фаза TiC в системе 3Ti-Si-2C, а также жидкий расплав Ti-Al и твердая фаза TiC в системе 3Ti-Al-2C. Полученные адиабатические температуры значительно превышают температуры плавления МАХ-фаз ($T_{пл}Ti_3SiC_2 = 2573$ К, $T_{пл}Ti_3AlC_2 = 2373$ К), а их образование происходит на стадии остывания продуктов горения.

Термодинамический анализ образования МАХ-фаз после сгорания исходных смесей проводился в режиме термодинамического равновесия при постоянном давлении.

Результаты термодинамического анализа для системы $3Ti+Si+2C$ представлены на рис. 1.

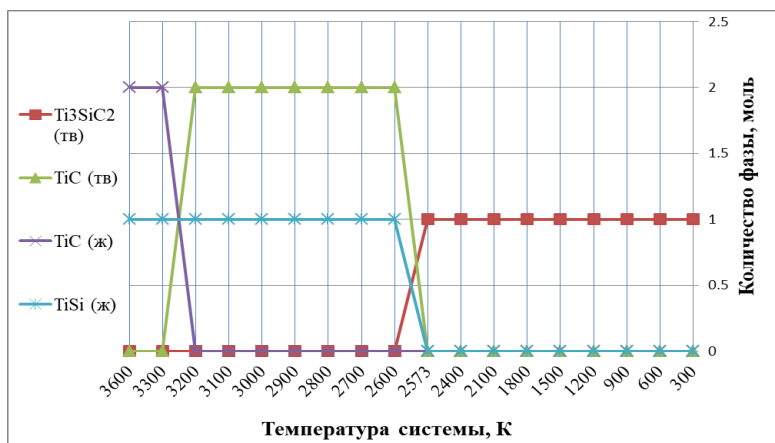


Рис. 1. Зависимость мольного состава равновесных продуктов синтеза от температуры системы 3Ti + Si + 2C

На рис. 1 показан фазовый состав продуктов реакции в системе 3Ti + Si + 2C при остывании образца после синтеза. Как известно [2, 3], Ti₃SiC₂ образуется в несколько стадий: образование карбида титана и жидкого расплава Ti-Si, затем растворение частиц карбида титана в жидком расплаве Ti-Si при остывании образца и образовании МАХ-фазы. Помимо МАХ-фазы Ti₃SiC₂ в синтезированном продукте могут образоваться побочные фазы: TiSi₂, TiSi, TiC, SiC. МАХ-фаза Ti₃SiC₂ становится термодинамически устойчивой при достижении температуры ее разложения – 2573 К. На рис. 1 видно, что при температуре выше 3200 К образуется жидкий расплав карбида титана и силицида титана. Далее в процессе остывания образца при температурах от 2573 К до 3300 К фазовый состав образца состоит из твердой тугоплавкой фазы карбида титана TiC и жидкого расплава Ti-Si. При температуре ниже 2573 К образуется однофазный продукт, состоящий из МАХ-фазы Ti₃SiC₂.

Результаты термодинамического анализа для системы 3Ti+Al+2C представлены на рис. 2, где показан фазовый состав продуктов реакции в системе 3Ti + Al + 2C при остывании образца после синтеза. Как известно [1, 4], МАХ-фаза Ti₃AlC₂ образуется в несколько этапов: образование частиц TiC и жидкого расплава Ti-Al и взаимодействия этого расплава с частицами TiC при остывании образца. Однако помимо МАХ-фазы Ti₃AlC₂ могут образоваться побочные фазы: интерметаллидов TiAl, Ti₃Al, TiAl₃, карбида алюминия Al₄C₃, карбида титана TiC. МАХ-фаза Ti₃AlC₂ становится термодинамически устойчивой ниже температуры ее разложения – 2373К. На рис. 2 видно, что при температуре выше 3300 К образуется жидкий расплав карбида титана и Ti-Al. Далее в процессе остывания образца при температурах от 2573 К до 3300 К фазовый состав образца состоит из твердой тугоплавкой фазы карбида титана TiC и жидкого расплава Ti-Al. При температуре ниже 2373 К образуется однофазный образец, состоящий из МАХ-фазы Ti₃AlC₂.

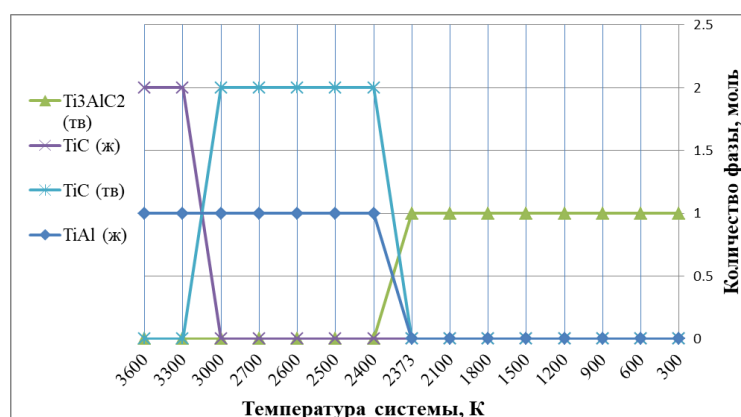


Рис. 2. Зависимость мольного состава равновесных продуктов синтеза от температуры системы 3Ti + Al + 2C

Высокоэнергетический метод СВС позволяет получать композиционные материалы со значительным содержанием химически инертного наполнителя. Даже при значительном содержании инертных добавок остается довольно высокая температура горения. Результаты термодинамических расчетов показали, что синтез методом СВС в режиме горения МАХ-фаз карбосилицида и карбоалюминиды титана из элементных порошков Ti, Si, Al, C в стехиометрических соотношениях 3Ti-Si-2C и 3Ti-Al-2C возможен. При температурах ниже температур плавления (разложения) МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_2 – 2573 К и 2373 К соответственно продукт синтезируется монофазным и состоит только из МАХ-фазы Ti_3SiC_2 или Ti_3AlC_2 . При температурах реакции выше температур плавления (разложения) МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_2 фазовый состав продуктов горения представляет собой расплавы Ti-Si или Ti-Al и твердую фазу карбида титана TiC. Выводы подтверждаются данными из литературных источников о двухстадийном процессе образования МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_2 при остывании образца после синтеза [2–4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gonzalez-Julian J. Processing of MAX phases: From synthesis to applications // *Journal of the American Ceramic Society*. 2020. Pp. 1–32. DOI: 10.1111/jace.17544
2. Synthesis of single-phase Ti_3SiC_2 with the assistance of liquid phase formation / Y. Zou, Z.M. Sun, Sh. Tada, H. Hitoshi // *Journal of Alloys and Compounds*. 2007. Vol. 441. Pp. 192–196. DOI: 10.1016/J.JALLCOM.2006.08.342.
3. Formation of Nanolaminate Structures in the Ti-Si-C System: A Crystallochemical Study / S.V. Konovalikhin, D.Yu. Kovalev, A.E. Sytschev, S.G. Vadchenko, and A.S. Shchukin // *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2014. Vol. 23. № 4. Pp. 216–220. DOI: 10.3103/S1061386214040049
4. Фазообразование в системе Ti-Al-C при СВС / Д.Ю. Ковалев, О.А. Аверичев, М.А. Лугинина, П.М. Бажин // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2017. № 4. С. 11–18. dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-11-18

СОЗДАНИЕ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ С ПОМОЩЬЮ ФОСФАТИРОВАНИЯ КАК МЕТОД БОРЬБЫ С КОРРОЗИЕЙ

Дубинов Ю.С., доцент, к.т.н., доцент, Танасенко М.С., ассистент

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация
E-mail: tanasenko.m@gubkin.pro

Проведен анализ рисков отказов промысловых трубопроводов на количественном (метод FMEA) и качественном (адаптированная диаграмма Исикавы) уровне. По полученным результатам выявлено, что основной причиной отказа промысловых трубопроводов являются коррозионные поражения как внутренней поверхности трубы, так и внешней. Модернизирован метод фосфатирования сталей. Разработана методика испытаний и представлены результаты. Отмечено влияние ортофосфорной кислоты на различные марки стали.

Ключевые слова: фосфатирование сталей, защита от коррозии, обработка сталей

CREATION OF OXIDE FILMS USING PHOSPHATING AS A METHOD OF COMBATING CORROSION

Dubinov Yu.S., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Tanasenko M.S., assistant

National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation
E-mail: tanasenko.m@gubkin.pro

An analysis of the risks of failures of field pipelines was carried out at a quantitative (FMEA method) and qualitative (adapted Ishikawa diagram) level. Based on the results obtained, it was revealed that the main reason for the failure of field pipelines is corrosion damage to both the internal and external surfaces of the pipe. The method of phosphating steels has been modernized. A test methodology has been developed and the results are presented. The effect of orthophosphoric acid on various grades of steel was noted.

Keywords: phosphating of steels, corrosion protection, steel processing

В свете значительного числа отказов промысловых трубопроводов вследствие коррозионных повреждений исследование и разработка новых и усовершенствованных методов защиты от коррозии представляют собой актуальную задачу для многих организаций.

В литературе [1–5] представлена статистика причин отказов промысловых трубопроводов, демонстрирующая, что более 60 % отказов обусловлены коррозионными повреждениями как во внутренних, так и во внешних слоях трубы (рис. 1).

Согласно анализу данных за 2020 год, общее количество аварий, зарегистрированных в российских компаниях, превысило отметку 7500 случаев, причиной более 4000 из которых стало коррозионное поражение. Эти результаты подчеркивают важность разработки инновационных технологий для защиты промысловых трубопроводов от коррозии, поскольку коррозионный износ является главной причиной отказов в данной области.

На основе существующих данных по частоте возникновения аварий было решено провести анализ оценки потенциальных рисков, приводящих к отказу трубопровода в процессе эксплуатации. Для этой цели выбраны два подхода: качественный и количественный.

Для проведения анализа риска промысловых трубопроводов на качественном уровне был выбран метод причинно-следственного анализа в виде диаграммы Исикавы. В данном исследовании использовалась модифицированная версия диаграммы Исикавы, основанная на классической схеме с пятью основными категориями причин, известной как 5M.

Анализ построенной диаграммы подтверждает, что основной причиной отказа при эксплуатации промыслового трубопровода являются коррозионные поражения.

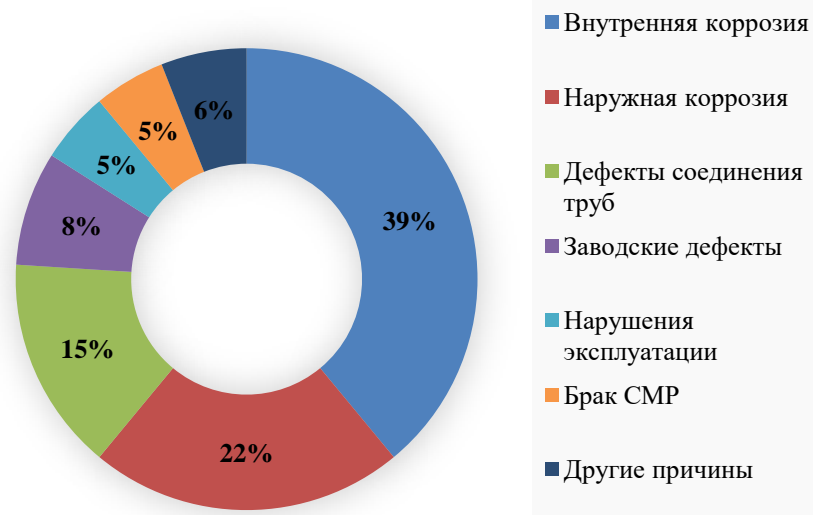


Рис. 1. Основные причины отказов промышленного трубопроводного транспорта

Для проведения анализа рисков промышленных трубопроводов на количественном уровне выбран FMEA метод (Failure Mode and Effects Analysis – анализ видов и последствий отказов). На основе работы экспертной комиссии выставлены баллы для каждого возможного риска [6] по приведенным в ГОСТ ИСО 31000 [7] и СП366.1325800 [2] шкалам оценивания.

Уровень рисков, оцениваемый по так называемому приоритетному числу рисков, рассчитывается по формуле

$$\text{ПЧР} = S \cdot O \cdot D, \quad (1)$$

где S – значение баллов значимости риска;
 O – значение баллов возникновения риска;
 D – значение баллов обнаружения риска.

Максимально допустимый показатель приоритетного числа рисков рассчитывается по половине максимального значения каждой шкалы.

$$\text{ПЧР}_{\text{допустимый}} = \frac{S_{\text{макс}} \cdot O_{\text{макс}} \cdot D_{\text{макс}}}{2}, \quad (2)$$

где $S_{\text{макс}}$ – максимальное значение баллов значимости риска;
 $O_{\text{макс}}$ – максимальное значение баллов возникновения риска;
 $D_{\text{макс}}$ – максимальное значение баллов обнаружения риска;

$$\text{ПЧР}_{\text{допустимый}} = \frac{10 \cdot 25 \cdot 10}{2} = 1250.$$

Внутренняя общая коррозия, внутренняя локальная коррозия различных видов и наружное коррозионное растрескивание превышают порог критической коррозионной скорости, в то время как значения внутренней эрозии, наличие сероводорода, расщелины, блистеринг и интенсивность работы электрохимической защиты приближаются к критическим значениям. На основании этого можно сделать вывод о том, что коррозионные повреждения являются основной проблемой при эксплуатации нефтегазового оборудования, и разработка новых методов защиты от коррозии является наивысшим приоритетом в данной отрасли.

Так как все существующие методы защиты от коррозии малоэффективны или дорогостоящи, принято решение о разработке нового способа коррозионной защиты.

Разработана методика испытаний обработки ортофосфорной кислотой трубных сталей, которая позволяет снизить скорость коррозии труб, подвергнутых эксплуатации, и тем самым увеличить надежность работы промышленных трубопроводов за счет увеличения долговечности работы труб и повышения наработки на отказ.

На рис. 2 приведены результаты эксперимента.

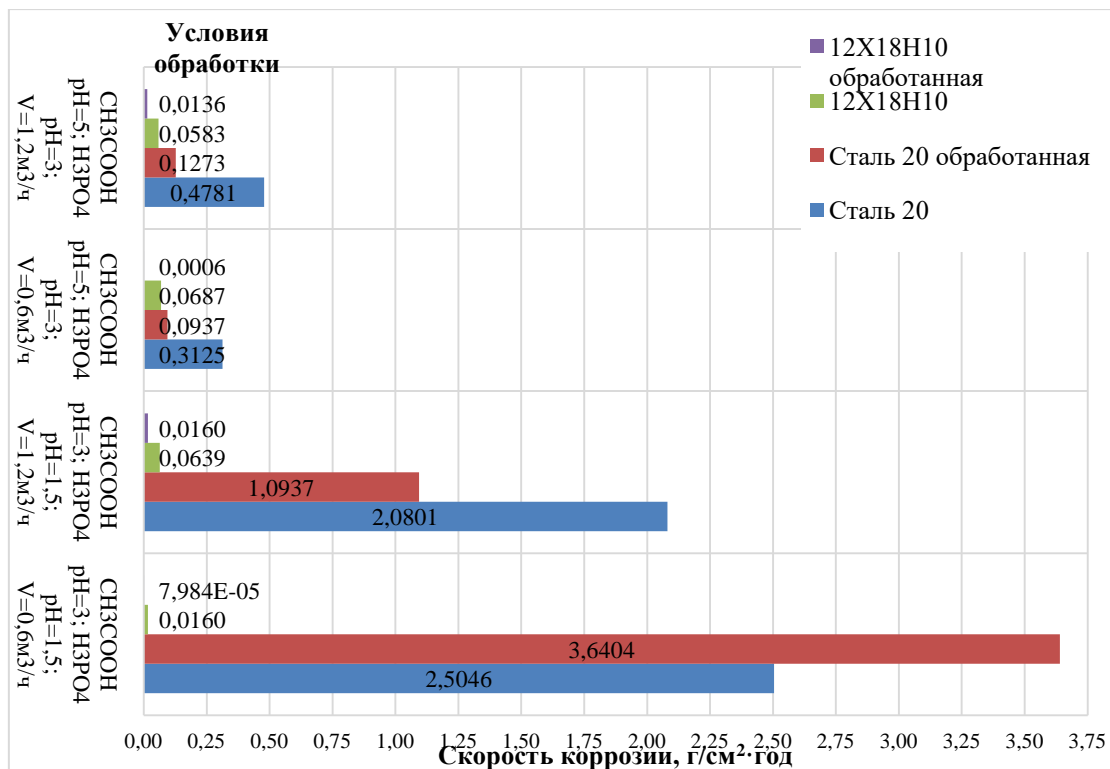


Рис. 2. Результаты эксперимента

По результатам проведенных циклов испытаний сделаны следующие выводы:

1. Применение технологии фосфатирование рекомендуется использовать только для эксплуатируемых труб.

2. Из результатов эксперимента следует, что при рН = 3 в растворе уксусной кислоты и рН = 1,5 в растворе ортофосфорной кислоты, а также при скорости потока 0,6 м³/ч скорость коррозии стали 12X18H10, подвергнутой процессу фосфатирования, уменьшилась на 99,5 %.

3. В результате эксперимента, проведенного при различных значениях рН (3 для уксусной кислоты и 1,5 для ортофосфорной кислоты) и скорости потока 1,2 м³/ч было установлено, что скорость коррозии нержавеющей стали 12X18H10, подвергнутой процессу фосфатирования, уменьшилась на 75 %. А для стали 20 это значение составило 47,41 %.

4. В результате эксперимента, проведенного при различных уровнях рН и скорости потока, было обнаружено, что скорость коррозии стали 12X18H10, подвергнутой процессу фосфатирования, уменьшилась на 99,07 % при рН = 5 в растворе уксусной кислоты, рН = 3 в растворе ортофосфорной кислоты и скорости потока 0,6 м³/ч. Аналогичным образом скорость коррозии стали 20 уменьшилась на 69,87 %.

5. Эксперимент, проведенный при различных значениях рН (5 и 3) в растворах уксусной и ортофосфорной кислот с использованием скорости потока 0,6 м³/ч, показал, что скорость коррозии нержавеющей стали 12X18H10, претерпевшей процесс фосфатирования, снизилась на 76,8 %, в то время как у стали 20 это снижение составило 73,43 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ причин отказов промышленных трубопроводов // Электрон. науч. журнал «Меридиан». 2020. Вып. № 5 (39).
2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: <https://www.gosnadzor.ru/> (дата обращения: 10.05.2023).
3. Острейковский В.А., Силин Я.В. Статистический анализ надежности нефтепромышленных трубопроводов // Электрон. науч. журн. Нефтегазовое дело. 2008. № 1. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Ostreikovskiy/Ostreikovskiy_1.pdf (дата обращения: 10.05.2023).
4. Методы неразрушающего контроля в трубопроводном транспорте / А.А. Антонов, Е.М. Вышемирский, О.Е. Капустин, А.К. Прыгаев. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2020. 273 с.
5. Гребенькова Г.Л., Мазитов А.И., Хамидуллин И.Ф. Противокоррозионная защита трубопроводов в ОАО АНК «Башнефть» // Территория Нефтегаз. 2010. № 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protivokorroziionnaya-zaschita-truboprovodov-v-oao-ank-bashneft> (дата обращения: 10.05.2023).
6. СП366.1325800-2017. Промысловые трубопроводы. Оценка технических решений на основе анализа риска. 2018. 28 с.
7. ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство (Переиздание). Введ. 2019-12-10. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ АУСТЕНИТА В ТОЛСТОЛИСТОВЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА ПРОКАТНОГО НАГРЕВА

Егоров Н.Т., заведующий кафедрой, к.т.н., доцент; Крымов В.Н., к.т.н., доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация
E-mail: roland2@mail.ru

Рассмотрены особенности процесса аустенитизации низколегированных сталей при термической обработке толстых листов в потоке прокатного стана с учетом условий их предварительного подстуживания после горячей прокатки и получаемых при этом структур. Уточнены представления о механизме образования аустенита при нагреве низколегированных сталей с исходной феррито-перлитной и аустенито-ферритной структурами. В сталях с ферритно-перлитной структурой обнаружено ориентированное образование аустенита на границах ферритных зерен и его рост по определенным кристаллографическим плоскостям. При нагреве стали с исходной аустенитно-ферритной структурой процесс образования аустенита при термообработке с фазовой перекристаллизацией не сопровождается ожидаемым измельчением зерна.

Ключевые слова: термическая обработка, аустенит, феррит, перлит, превращение

FEATURES OF AUSTENITE FORMATION IN THICK-SHEET, LOW-ALLOYED STEELS DURING HEAT TREATMENT USING HEAT OF ROLLING HEATING

Egorov N.T., Head of the Department, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Krymov V.N., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation
E-mail: roland2@mail.ru

Peculiarities of austenitization of low-alloyed steels during heat treatment of thick-sheet are studied taking into account preliminary cooling of plates after hot rolling of them and their structure. Improved understanding of the mechanism of austenite formation when heating low-alloy steels with initial ferrite-pearlite and austenite-ferritic structures. In steels with a ferritic-pearlitic structure, the oriented formation of austenite at the boundaries of ferritic grains and its growth along certain crystallographic planes were found. When heating steel with the initial austenite-ferritic structure, the process of austenite formation during thermal treatment with phase recrystallization is not accompanied by the expected grain size reduction.

Keywords: heat treatment, austenite, ferrite, pearlite, transformation

Толстолистовой прокат из низколегированных сталей для придания ему необходимого комплекса механических и технологических свойств подвергается различным видам термической обработки, предусматривающим обязательную их аустенитизацию.

Эффективность аустенитизации во многом зависит от исходной структуры сталей. Малоуглеродистые низколегированные стали при термической обработке толстых листов в потоке прокатного стана в зависимости от температуры их предварительного подстуживания после горячей прокатки имеют феррито-перлитную или аустенито-ферритную структуру.

Процесс аустенитизации стали с ферритно-перлитной структурой изучался многими исследователями [1–3]. Однако многие вопросы, касающиеся механизма $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения в малоуглеродистых сталях, до сих пор остаются дискуссионными. Исследований по влиянию исходной аустенито-ферритной структуры на процесс аустенитизации сталей при последующей термической обработке практически не проводилось.

Изучали образование аустенита в низколегированных сталях 10ХСНД и 10Г2С1 применительно к реальным условиям их нагрева при проведении термической обработки

толстых листов в потоке прокатного стана с учетом их предварительного подстуживания в межкритическом и субкритическом интервалах температур.

Установлено, что в сталях с исходной аустенито-ферритной структурой, которая была получена в результате подстуживания с 1050 °С до межкритического (750 °С) интервала температур, процесс образования аустенита при повторном нагреве до 930 °С не сопровождается ожидаемым измельчения зерна, т. е. получающееся зерно не отличается по размерам и форме от исходного, имеющегося после нагрева на 1050 °С (рис. 1).

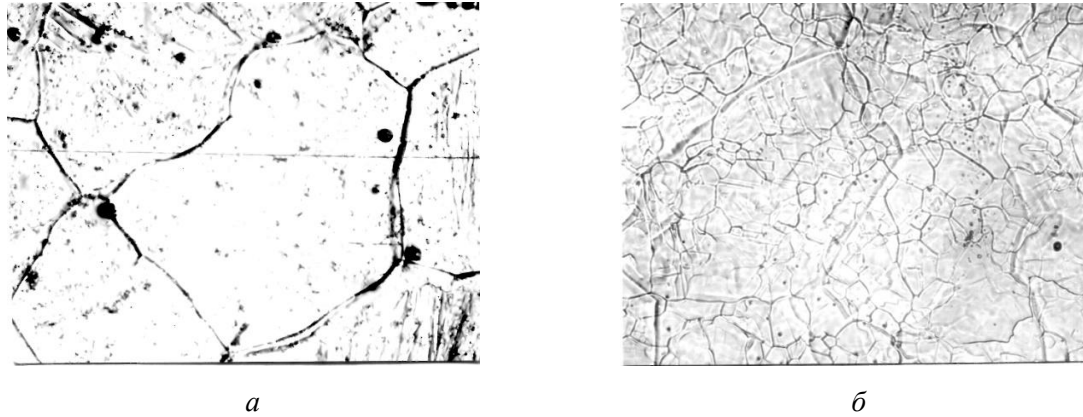


Рис. 1. Изменение аустенитного зерна предварительно перегретой (1050 °С) стали 10ХСНД при повторном нагреве на 930 °С после предварительного подстуживания до 750 (а) и 600 °С×400

Восстановление бывших аустенитных зерен при повторном нагреве объясняется влиянием на структурный механизм $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения участков аустенита, не претерпевшего превращения в результате предварительного охлаждения. Характерно, что исчезновение избыточного феррита, выделяющегося, как известно, при подстуживании до 750 °С в виде сетки по границам бывших аустенитных зерен, происходит преимущественно благодаря миграции границ аустенитного участка в направлении поглощаемого феррита, обеспечивая при этом полное восстановление формы и размеров исходного зерна аустенита.

Наряду с восстановлением аустенитного зерна при повторном нагреве стали с температурой предварительного подстуживания 750 °С наблюдается также образование небольшого количества новых зерен, по размерам практически не отличающихся от исходных, но не совпадающих с ними по форме. Заслуживает внимания и тот факт, что при этом в структуре стали были обнаружены отдельные участки с аномально крупным зерном. Образование отдельных крупных зерен аустенита происходит преимущественно за счет окружающих его более мелких зерен γ -фазы. Процесс этот аналогичен процессу укрупнения зерен при собирательной рекристаллизации, за тем исключением, что в этом случае растут лишь отдельные аустенитные зерна.

Одной из причин аномального роста отдельных зерен является состояние аустенито-ферритной матрицы к моменту начала $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения. Наличие участков рекристаллизованной α -фазы приводит к формированию различно ориентированных зародышей аустенита, стабилизирующих исходную матрицу, увеличивая разнотерность и способствуя тем самым избирательному росту тех аустенитных участков, которые к этому моменту имели или достигли значительных размеров в результате миграции межфазной границы. Кроме того, при возникновении новых аустенитных зерен в рекристаллизованной матрице некоторые из них могут быть отделены от остальных частично сопряженными границами, в результате чего они также приобретают способность к более быстрому росту, но при этом никакой связи их с бывшим зерном аустенита не наблюдается. Возможной причиной роста отдельных аустенитных зерен может являться неоднородность их химического состава, усугубляющаяся перераспределением углерода и легирующих элементов между α - и γ -фазами в межкритическом интервале температур.

Обнаруженный факт восстановления и укрупнения зерна аустенита при нагреве стали с исходной аустенито-ферритной структурой позволяет утверждать, что термическая обработка толстых листов с температурой горячего посада из межкритического интервала не только не обеспечивает улучшение комплекса механических свойств горячекатаного металла, но в ряде случаев может привести к их ухудшению. Данный вывод подтверждается результатами промышленных испытаний при производстве толстых листов на стане 3600 ММК «Азовсталь» [4].

Термическая обработка стали с исходной ферритно-перлитной структурой, которая образуется при подстуживании листов после горячей прокатки в субкритическом интервале (500–600 °С) температур, приводит к эффективному измельчению аустенитного зерна в результате фазовой перекристаллизации (рис. 1). Однако степень измельчения аустенитного зерна и интенсивность $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения при этом в значительной мере зависит от однородности и дисперсности ферритно-перлитной структуры, которая определяется величиной переохлаждения аустенита в результате подстуживания и зависит от температурно-деформационных параметров горячей прокатки. Исходная разнотернистость горячедеформированного аустенита способствует формированию неоднородной феррито-перлитной структуры, которая осложняет процесс структурной перекристаллизации, инициируя избирательный рост отдельных γ – зерен при нагреве.

Характерной особенностью процесса аустенитизации малоуглеродистых сталей с исходной феррито-перлитной структурой является образование аустенита не только в перлите, но и на границе ферритных зерен. Первыми аустенитизируются перлитные участки, причем зарождается аустенит преимущественно на торцах цементитных пластин в местах их выхода на границы перлитных колоний и реже – на поверхности раздела ферритных и цементитных фаз. В последнем случае образование аустенита более легко происходит вдоль ферритных пластин перлита, поскольку цементитные пластины при этом выполняют барьерную роль в $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении. В отдельных участках, где непрерывность цементита нарушена, аустенит образуется и в соседних пластинах феррита.

Важным является факт зарождения аустенита непосредственно на границах ферритных зерен. При нагреве сталей выше точки A_{c1} на границах ферритных зерен первоначально появляется аустенитная оболочка, а затем, с повышением температуры, аустенит разрастается в виде семейства параллельных пластин, расположенных по одну сторону границы ферритного зерна, реже – по обе стороны. Как правило, пластины аустенита связаны друг с другом общим основанием и одинаково ориентированы внутри ферритного зерна. Угол между параллельными рядами пластин обычно составляет 60 или 120 ° (рис. 2).

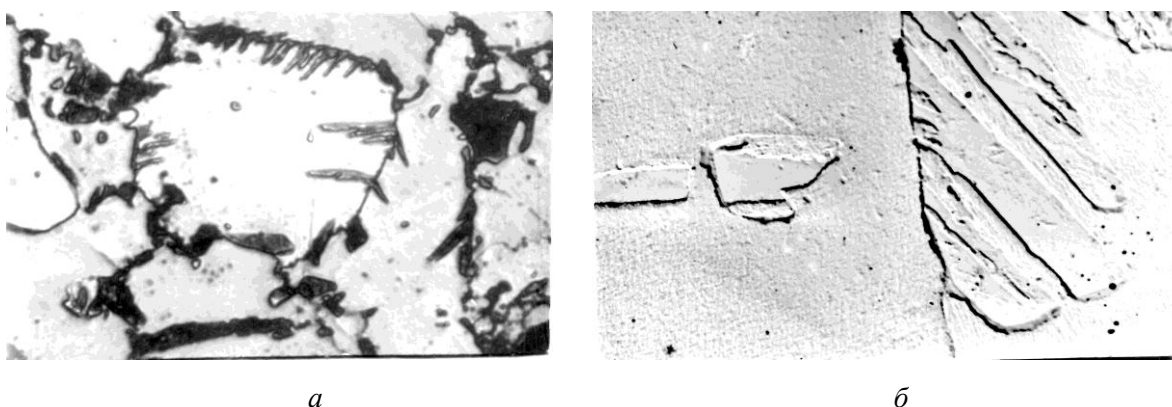


Рис. 2. Ориентированное образование аустенита при нагреве стали 10XСНД до 780 °С:

$a - \times 1000, \quad б - \times 4200$

При нагреве выше определенной пороговой температуры, что для исследованных сталей соответствует значениям 760–780 °С, наблюдается всплеск ориентированного зарождения аустенита в пределах ферритного зерна. Форма аустенитных участков в этом случае

имеет вид ярко выраженных пластин (игл), зарождающихся у границ ферритных зерен и растущих внутри них по определенным кристаллографическим плоскостям.

Ориентированное образование аустенита и наличие кристаллографической связи со структурно-свободным ферритом свидетельствует о видманштеттовом характере такого полиморфного превращения.

Значительный интерес представляет тот факт, что многие зародившиеся в феррите аустенитные участки вообще не имеют контакта с перлитом и массивами ранее образовавшегося аустенита. Это указывает на то, что границы зерен, как в равной степени и другие структурные несовершенства α -фазы, в энергетическом отношении являются весьма благоприятными местами зарождения аустенита, а в ходе дальнейшего развития аустенитного превращения возможно перемещение углерода не только в направлении «цементит – аустенит – феррит», но также в направлении «цементит – феррит – аустенит».

При температуре нагрева выше $820\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение в сталях реализуется путем роста уже существующих участков γ -фазы при практически полном отсутствии их нового зарождения. При этом пластины аустенита утолщаются и больше проникают вглубь ферритного зерна, а ферритные промежутки, разделяющие их, исчезают.

Проведенные исследования показывают, что процесс аустенитизации малоуглеродистых сталей с ферритно-перлитной структурой протекает в две стадии. Несмотря на небольшие ($15\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурные разрывы между превращением в аустенит перлита и структурно-свободного феррита их наличие достаточно надежно фиксируется металлографическими методами и измерением электросопротивления.

При определенных условиях нагрева малоуглеродистых сталей образование аустенита в ферритных зернах может начаться раньше, чем завершается превращение в перлитных участках. Интенсивность превращения в этом случае также определяется протеканием этих двух процессов, связанных с одновременным зарождением γ -фазы и ее ростом или только ростом.

Сложный характер процесса аустенитизации при нагреве малоуглеродистых сталей с различной исходной структурой необходимо учитывать при разработке и реализации интенсивных процессов термической обработки толстых листов в потоке прокатного стана с использованием тепла прокатного нагрева.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дьяченко С.С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах. М.: Металлургия, 1982. 128 с.
2. Садовский В.Д. Структурная наследственность стали. М.: Металлургия, 1973. 208 с.
3. Кваша А.В., Дьяченко В.С., Дьяченко С.С. О влиянии размера зерна на торможение альфа- и гамма-превращения при непрерывном нагреве // Металловедение и термическая обработка. 1988. С. 12–17.
4. Нормализация толстолистовой стали с использованием тепла нагрева перед прокаткой / М.С. Подгайский, Н.Т. Егоров, А.Н. Занес, Л.И. Разумова // Бюллетень института «Черметинформация». 1975. № 8. С. 50–51.

УДК 669.018.95+621.762+536.46

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА TiC-Cu ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИНФИЛЬТРАЦИИ РАСПЛАВОМ МЕТАЛЛА КЕРАМИЧЕСКОГО СВС-КАРКАСА

Каракич Е.А., аспирант, **Амосов А.П.**, д.ф.-м.н., профессор, **Латухин Е.И.**, к.т.н., доцент, **Умеров Э.Р.**, к.т.н.

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: maximcaracki4@gmail.com*

Представлен обзор существующих технологий синтеза композиционного материала системы TiC-Cu. Рассмотрены их свойства, преимущества и недостатки. Приведены результаты реализации данной технологии путем создания лабораторной установки и получения композитов.

Ключевые слова: металлотермия, СВС-металлургия, композиционные материалы, порошковая металлургия, тигли

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR PRODUCING CERAMIC-METAL COMPOSITE TiC-Cu BY USING A METAL-THERMAL PROCESS FOR INFILTRATION OF A CERAMIC SHS-FRAME WITH A METAL MELT

Karakich E.A., PhD student, **Amosov A.P.**, Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor, **Latukhin E.I.**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Umerov E.R.**, PhD in Engineering Sciences

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: maximcaracki4@gmail.com*

This paper presents an overview of existing technologies for the synthesis of composite material of the TiC-Cu system. Their properties, advantages and disadvantages are considered. The results of the implementation of this technology by creating a laboratory installation and the resulting composites are presented.

Keywords: metallothermy, SHS metallurgy, composite materials, powder metallurgy, crucibles

Наиболее эффективным решением проблемы растущих требований современной техники к уровню свойств материалов являются создание новых композиционных материалов, позволяющих объединить преимущества разнородных материалов, а также разработка новых энергосберегающих технологий их получения. Керамико-металлические композиты (керметы) благодаря присутствию металлической фазы меньше подвержены хрупкости керамических фаз, обеспечивая повышенную пластичность и прочность за счет улучшения вязкости (трещиностойкости) композитов при сохранении их «керамических» свойств (твердости, износостойкости, жаропрочности, химической стойкости, низкого удельного веса).

В основу перспективного метода создания новых композиционных материалов может лечь явление самопроизвольной инфильтрации (пропитки) пористого керамического тела (каркаса) металлическим расплавом за счет капиллярного эффекта. К достоинствам этого метода относятся возможность изготавливать габаритные изделия сложной формы и низкой стоимости по сравнению с методами порошковой металлургии. Однако осуществление самопроизвольной инфильтрации неразрывно связано с обеспечением хорошего смачивания расплавом металла керамической фазы, а также с получением керамической фазы в виде заготовки с равномерной открытой пористо-капиллярной структурой, способной впитать расплав металла.

Для решения данных задач несомненный интерес представляет применение простого энергосберегающего процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

(СВС), позволяющего синтезировать многие керамические соединения в режиме горения, продуктом которого являются пористые каркасы с высокой температурой (2000–3000 °С), обеспечивающей смачивание расплавом металла.

Для получения расплава металла и обеспечения полной инфильтрации керамического СВС-каркаса может быть использована независимая от СВС-реакции металлотермическая реакция различных термитных составов (на основе меди и алюминия). Металлотермитные реакции являются достаточно простым способом получения расплава металла, не требуют сложного оборудования и высоких затрат энергии.

Работы по созданию композитов системы «карбид титана – медь» наиболее широко рассмотрены в зарубежных литературных источниках. Самыми распространенными являются технологии электроконтактного спекания, спекания при применении магнитно-импульсного прессования, электроимпульсного плазменного спекания, синтез в разряде тлеющей плазмы, а также силовое СВС-прессование.

Электроимпульсным и электроконтактным способами спекания также можно получать изделия с уникальными сочетаниями материалов и с заданными физико-механическими свойствами, которые нельзя получить традиционными методами порошковой металлургии.

При этом время спекания колеблется в пределах от нескольких секунд до нескольких минут. Кроме того, воздействием электрического тока при высокотемпературной обработке можно существенно изменить свойства рабочих поверхностей деталей из медных сплавов [1].

Способ электроконтактного спекания отличается от обычного печного спекания своей физической сущностью. При этом методе температура нагрева порошковой смеси не превышает 0,7–0,9 температуры плавления основного компонента (меди) [2].

Также композиты системы «карбид титана – медь» были получены путем расплавления большого количества меди в высокочастотной индукционной печи. В полученный расплав вводились спрессованные брикеты карбида титана с большой добавкой графита [3].

Сложность всех вышеперечисленных технологий заключается в необходимости долгой подготовки шихты, наличия дорогого и энергозатратного оборудования.

Для реализации термитной СВС-реакции была создана оснастка, способная выдержать высокие температуры синтеза и при этом обладающей жесткостью конструкции.

Как оптимальный по прочностным характеристикам и рабочей температуре и, кроме того, широко представленный на рынке было решено выбрать мезкозернистый графитовый огнеупорный материал, а именно искусственный графит марки МПГ-7 на основе коксо-пекового композита. Данный материал является высокопрочным и термически стойким.

При проектировании лабораторной тигельной оснастки для процессов СВС-металлотермии было решено разделить установку тиглями на две зоны, а именно – зону термитной реакции, где происходит инициирование термитной реакции, образование расплава металла и процессы фазоразделения, и зону СВС-реакции, инициируемой от расплава металла, где происходит образование твердого СВС-каркаса, инфильтрация каркаса расплавом металла и остывание полученного продукта. Также для более простого извлечения получаемого продукта из тигля был предусмотрен литейный уклон – на манер литейных тиглей.

Принципиальная конструкция такого тигля предусмотрена на рис. 1.

Самую простую лабораторную оснастку составляют следующие детали:

1. Позиция *A* – Крышка для закрытия полости верхнего тигля с предусмотренным отверстием для зажигания термитной смеси. Между поверхностями внутреннего диаметра и выступа крышки предусмотрен тепловой зазор, составляющий 0,5 мм.

2. Позиция *B* – Верхний тигель для термитной реакции. Представляет собой прямой цилиндр с классным отверстием для более легкого протекания расплава металла в полость нижнего тигля.

3. Позиция *B* – Разделяющая шайба для разделения полостей термитной реакции и СВС-реакции. В верхней части предусмотрен паз для установки стального вкладыша, необходимого для предотвращения высыпания термитной смеси в СВС-шихту и задержки, необходимой для фазоразделения расплавов окиси алюминия и окиси меди.

4. Позиция Г – Нижний тигель для СВС-реакции и пропитки СВС-каркаса. Представляет собой цилиндр с предусмотренным литейным уклоном согласно ГОСТ Р 53465-2009. Также у верхнего торца тигля предусмотрены два воздуховода для более легкого удаления газа из рабочей полости тигля и исключения возможности возникновения избыточных давлений во время синтеза.

5. Позиция Д – Массивное основание, исключающее контакт горячего продукта с поверхностью лабораторного рабочего места и обеспечивающее устойчивость всей оснастки во время проведения синтеза. В днище предусмотрено технологическое отверстие для возможности поджига с целью изменения процесса инфильтрации горячего СВС-каркаса жидким металлом. [4]

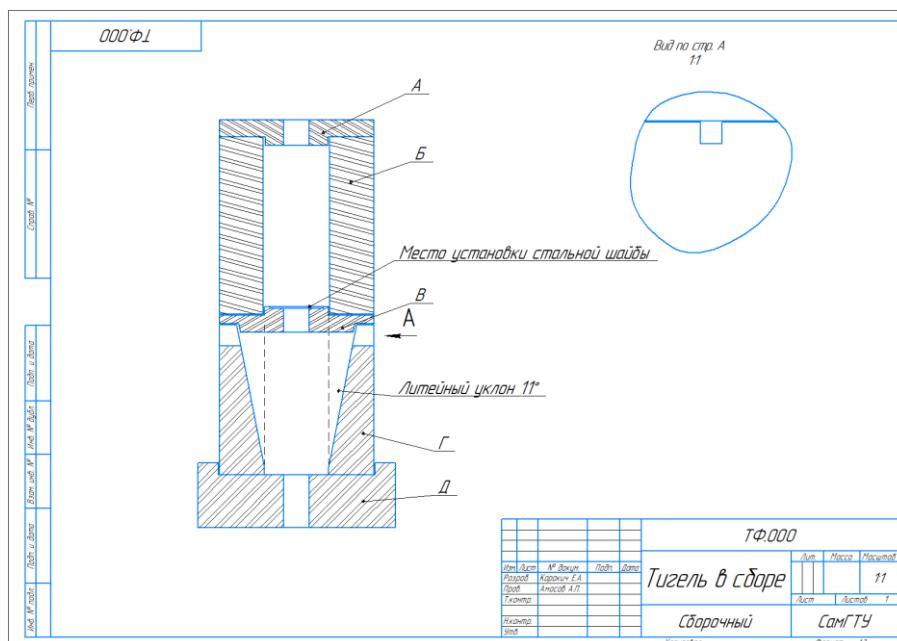


Рис. 1. Принципиальная конструкция тигля для СВС-металлотермии

Для получения полностью пропитанных медью образцов необходимо составить условия, в которых количество меди могло заполнить все свободные поры брикета TiC. Для этого термитная смесь бралась с избытком по массе на 50 % от массы шихты Ti+C, а так как основным компонентом (до 70 %) является оксид меди, опыты производились с дополнительной навеской меди. Данная добавка чистой меди позволяет снизить температуру реакции и увеличить количество жидкой меди для более полных условий пропитки.

Горячий пористый каркас под действием капиллярных сил втягивает в поры фазоразделенный расплав меди, образуя при остывании дисперсно-упрочненный композитный материал с керамической матрицей из карбида титана и металлических включений меди и интерметаллидов титана и меди.

Была проведена серия экспериментов с использованием термитной смеси в верхнем тигле.

Эксперименты производились в насыпном неуплотненном виде с чистыми смесями реагентов, а именно с термитной смесью по ТУ 1793-002-12719185-2009, включающей:

- 1) порошок оксида меди (CuO) – до 70 % масс.;
- 2) порошок алюминия марки ПА-4 (Al) – до 10 % масс.;
- 3) порошок меди марки ПМС-Н (Cu) – до 12 % масс.;

4) порошок ферромарганца ФМН88 (FeMn) – до 8 % масс. в количестве 100 грамм смеси и приготовленной смесью Ti+C в количестве 50 грамм с соотношением компонентов 4 к 1.

Первый эксперимент производился для определения возможности процесса СВС от расплава, полученного в результате термитной реакции в чистых смесях, без дополнительной насыпки реагентов.

Зажигание производилось термитной спичкой. Термитная реакция происходила быстро, с большим количеством выбросов газа. После остывания был получен слиток массой 86,4 грамма с значительной видимой медной воронкой, образовавшейся из-за удара расплавленной меди в неспрессованный порошок Ti+C.

Второй и третий эксперименты производились в таких же условиях, как и первый. Исключением было замещение некоторого процента от массы термита чистой медью. Навеска составила 15 и 20 грамм соответственно. В данных экспериментах были получены слитки массами 81 грамм для эксперимента с 15 % навески и 86,8 грамм для эксперимента с 20 % навески. Внешний вид слитков схож с вышепредставленным, слитки имеют большие поры, медный «бортик», однако массы образцов, как и толщины пропитанного слоя выше, чем у слитка первого эксперимента.

При проведении эксперимента с навеской меди, превышающей 25 %, зажигания термитной смеси не происходит. Таким образом, был найден предел разбавления термитной смесью с помощью меди.

Полученные композиционные материалы являются прочными слитками с большим пределом прочности при обработке резанием, превосходящим нержавеющие стали.

Разрез и отбор образцов производился с помощью УШМ и отрезных дисков диаметром 250 мм для нержавеющих высокопрочных сталей. Затем полученные образцы шлифовались на шлифовальных кругах с увеличением зернистости для получения поверхности, необходимой для анализа.

С помощью электронного сканирующего микроскопа JSM 7001FA (JEOL) и дифрактометра был произведен рентгенофазовый анализ образцов, выбранных из середины полученных слитков. Данные рентгенофазового анализа приведены на рис. 2–4.

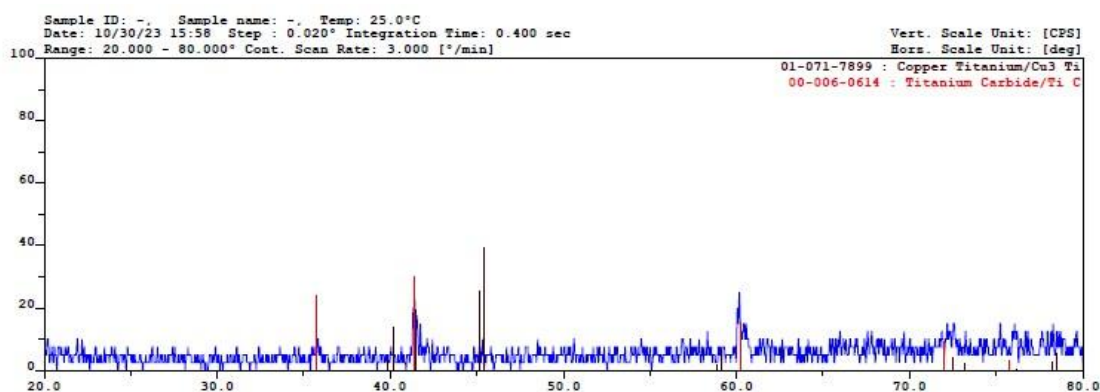


Рис. 2. Дифрактограмма анализа образца без добавок меди

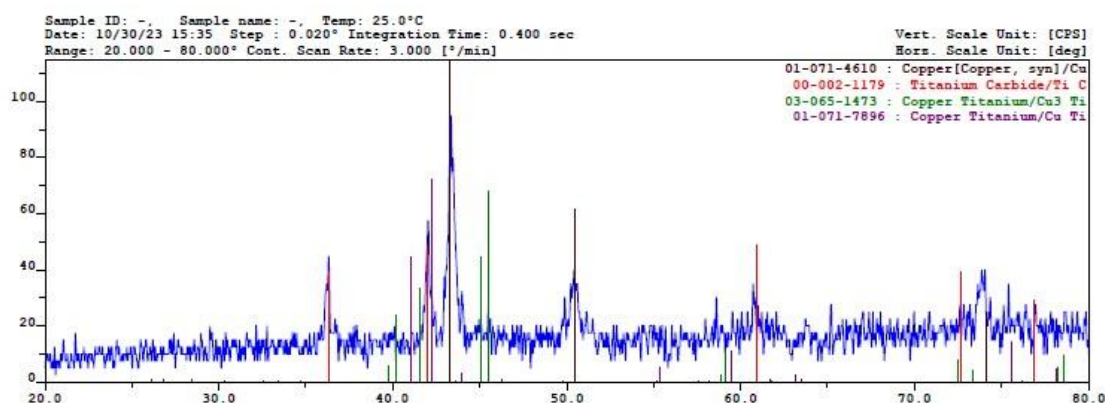


Рис. 3. Дифрактограмма образца с 15 % навеской меди

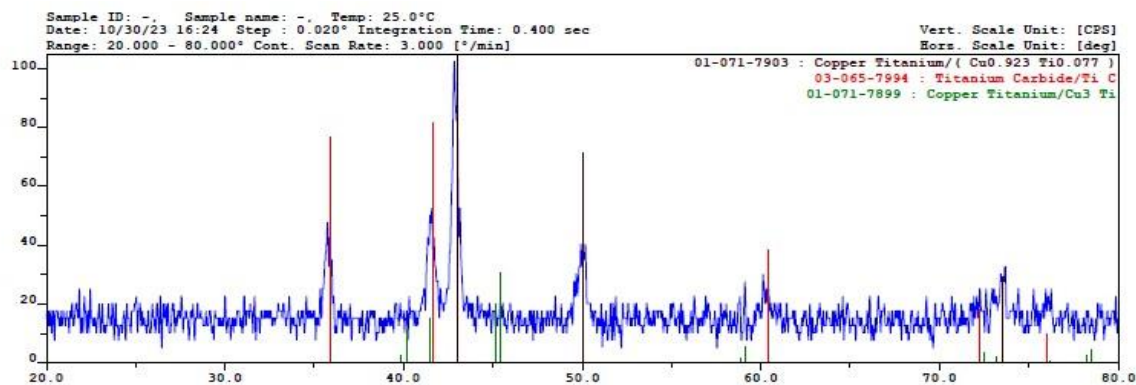


Рис. 4. Дифрактограмма образца с 20 % навеской меди

Как видно из полученных данных, продуктами синтеза является механическая смесь карбида титана, интерметаллидов титана и меди, а также в некоторых случаях – чистой меди. Наличие фазы TiC говорит о том, что инициация процесса СВС возможна от температуры полученного расплава меди во всех трех случаях. Также видно, что увеличение добавки меди и снижение температуры реакции приводит к изменению состава композита. Триботехнические свойства и их зависимости от условий синтеза будут рассмотрены в последующих работах, так же как и данные элементного анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Паульс В.Ю., Филатов А.С. Электродиффузионная термическая обработка бронзы БрОФ7-0.2 // Современные научно-практические решения в АПК: сборник статей II всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Тюмень: ГАУ Северного Зауралья. 2018. С. 414–418.
2. Рожкова Т.В. Исследование новых способов электроконтактного спекания порошковых материалов // Вестник гос. аграрн. ун-та Северного Зауралья. 2016. № 2. С. 122–129.
3. Xuexia Xu, Wenbin Li, Yong Wang. Study of the preparation of Cu-TiC composites by reaction of soluble Ti and ball-milled carbon coating TiC // Results in Physics. 2018. 9. С. 486–492.
4. Каракич Е.А. Амосов А.П. Конструирование оснастки для сочетания термитного и СВС процессов получения каркасных керметов // Современные материалы, техника и технологии. Университетская книга. Курск, 2024. № 2. С. 7.

УДК 621.74 + 669.018

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВА АМg2, АРМИРОВАННЫХ ФАЗОЙ КАРБИДА ТИТАНА

Качура А.Д., аспирант, Луц А.Р., к.т.н., доцент, Шерина Ю.В., аспирант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: ruw224@mail.ru

Приведены результаты исследования физико-механических свойств, полученных методом СВС композиционных материалов на основе промышленного сплава АМg2, армированного 10 и 20 масс. % TiC. В процессе исследования были получены данные по плотности, пористости, электропроводности, твердости, напряжению течения при испытании на сжатие и ударной вязкости. Установлено, что у композита АМg2-20 % TiC наблюдается увеличение твердости и прочности по сравнению с образцом, включающим 10 масс. % TiC, но при этом увеличивается пористость и снижается ударная вязкость.

Ключевые слова: АМg2, TiC, композит, самораспространяющийся высокотемпературный синтез

STUDY OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON АMg2 ALLOY REINFORCED WITH TITANIUM CARBIDE PHASE

Kachura A.D., PhD student, Luts A.R., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Sherina Ya.V., PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: ruw224@mail.ru

The work presents the results of a study of the physico-mechanical properties of composite materials obtained by the SHS method based on an industrial alloy АMg2 reinforced with 10 and 20 wt. % TiC. In the course of the study, data were obtained on density, porosity, electrical conductivity, hardness, flow stress during compression testing and toughness. It was found that the АMg2-20 % TiC composite has an increase in hardness and strength compared to the sample comprising 10 wt. % TiC, but at the same time porosity increases and impact strength decreases.

Keywords: АMg2, TiC, composite, self-propagating high-temperature synthesis

Алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ), дисперсно-армированные тугоплавкой фазой карбида титана, характеризуются малым удельным весом, повышенными значениями твердости, а также хорошей технологичностью. Наиболее перспективной технологией получения АМКМ является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), в ходе которого армирующая фаза формируется непосредственно в расплаве матрицы, что позволяет решить проблему смачиваемости, присущую большинству остальных методик. Также метод СВС прост в технологическом исполнении, реализуется в любой плавильной печи и не требует существенных энергозатрат [1].

В последнее время получает активное развитие еще одно направление: армирование фазой карбида титана не алюминиевой матрицы, а промышленных сплавов на алюминиевой основе, которые не отличаются высокими механическими характеристиками, например магниев. Наличие магния в составе матричного сплава способствует твердорастворному упрочнению, а также позволяет улучшить смачиваемость вводимой армирующей фазы [2]. Однако эффективность подобного армирования сплавов определяется количеством керамической фазы [3]. В связи с этим целью данной работы стало проведение синтеза и затем сравнительного анализа физико-механических свойств АМКМ, полученных методом СВС в расплаве, на основе промышленного сплава АМg2 с содержанием армирующей фазы 10 и 20 масс. % TiC.

Для синтеза композиционного материала применялся промышленный сплав АМг2 (ГОСТ 4784-97), порошки титана ТПП-7 (ТУ1715-449-05785388), углерода П-701 (ГОСТ 7585-86), в качестве флюса использовали порошок Na_2TiF_6 (ТУ 6-09-01-425-77). Перед замешиванием порошки титана и углерода подвергались сушке, затем смешивались в стехиометрическом соотношении 4:1 с последующим добавлением 5 масс. % Na_2TiF_6 от исходной массы шихты. Далее спрессованные шихтовые таблетки последовательно погружались в расплав при температуре 900 °С, происходила выдержка расплава в течение 5 минут с последующей разливкой в стальной кокиль. Металлографический анализ осуществляли при помощи растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6390A. Определение плотности образцов проводилось путем гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018-74. Твердость исследовалась на твердомере ТШ-2М по ГОСТ 9012-59, прочность на сжатие – по ГОСТ 25.503-97 на образцах III типа с диаметром $d_0 = 20$ мм. Для анализа электропроводности применялся вихре-токовый структуроскоп ВЭ-26НП (ГОСТ 27333-87). Ударная вязкость испытывалась на копре маятниковом JBS-300 (ГОСТ 9454-78).

Микроструктура полученных образцов приведена на рис. 1.

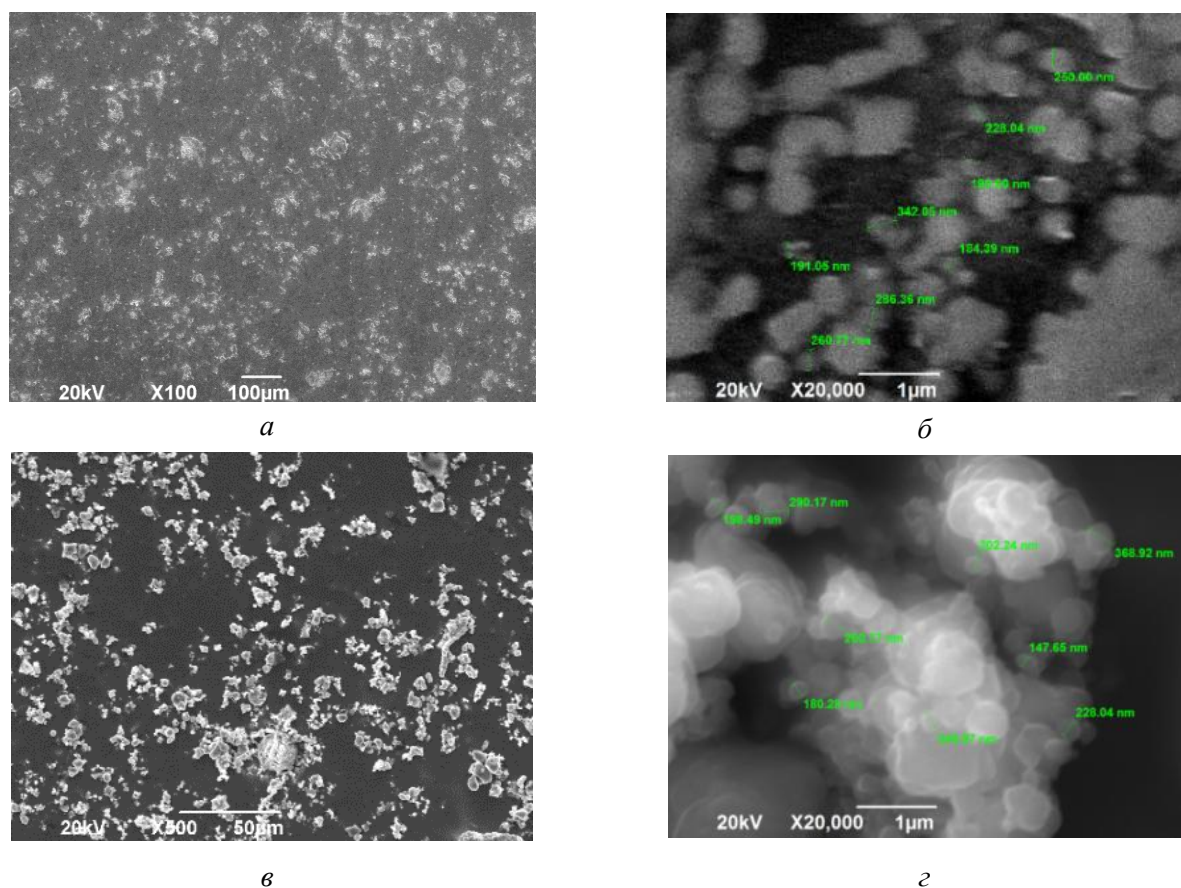


Рис. 1. Микроструктура композиционных материалов:
a – АМг2–10 % TiC; *б* – АМг2–20 % TiC

Для определения влияния, оказанного армированием тугоплавкой фазой карбида титана на свойства матричного сплава АМг2, был произведен сравнительный анализ физико-механических свойств, представленный в таблице.

Плотность композиционных материалов несколько выше плотности матричного сплава, что является следствием присутствия карбида титана. Путем сравнения экспериментальной и теоретической плотностей выявлено, что остаточная пористость композита с содержанием армирующего карбида титана 20 масс. % значительно превышает пористость композита с долей армирования карбидом титана в 10 масс. %, что может быть следствием более значительного экзотермического эффекта в процессе проведения СВС.

Физико-механические свойства образцов

	Плотность теорет., ρ_t , г/см ³	Плотность эксп., $\rho_{\text{э}}$, г/см ³	Пористость, П, %	Электропроводность, МСм/м	Твердость НВ ⁻¹ , МПа	Испытание на одноосное сжатие		Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
						Напряжение течения, σ_s , МПа	Относит. деформация, ϵ , %	
AMg2H	2,69	–	–	19,7	59,4	290	69,19	109,52
AMg2-10 % TiC	2,820	2,797	0,82	15,4	59,4	271	59,7	20,76
AMg2-20 % TiC	3,144	2,957	5,94	14,71	66,5	320,87	64,88	11,36

Значения электропроводности композиционных материалов несколько ниже, чем у матричного сплава, что также связано с наличием керамической фазы. Следует отметить, что при доле армирования TiC 20 масс. % удается повысить показатели твердости на 7 НВ (рис. 2), а также существенно увеличить напряжение течения композита – на 10,6 % относительно базового сплава и на 18,4 % по сравнению с композитом, армированным 10 масс. % TiC (рис. 3). Исследования на ударную вязкость показали резкое снижение ее показателей – в 5,27 и 9,64 раза соответственно (рис. 4).

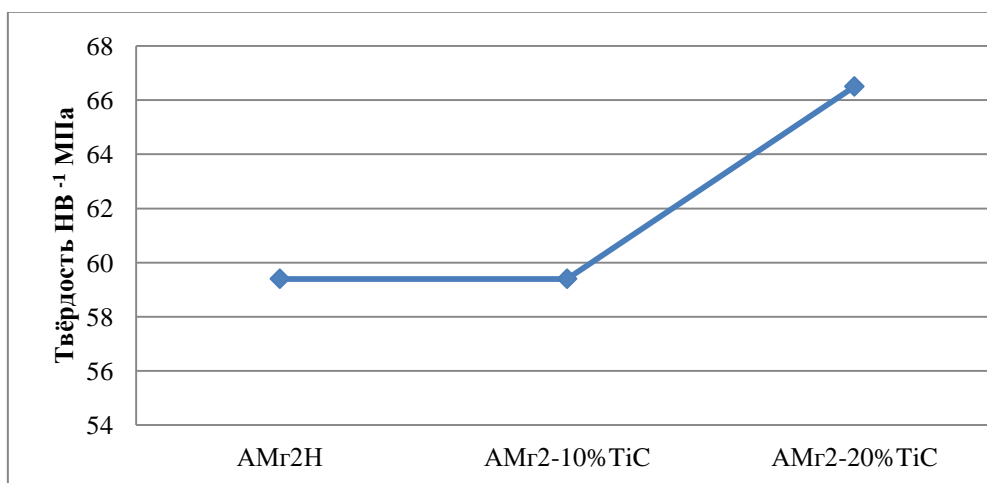


Рис. 2. Твердость композиционных материалов на основе AMg2

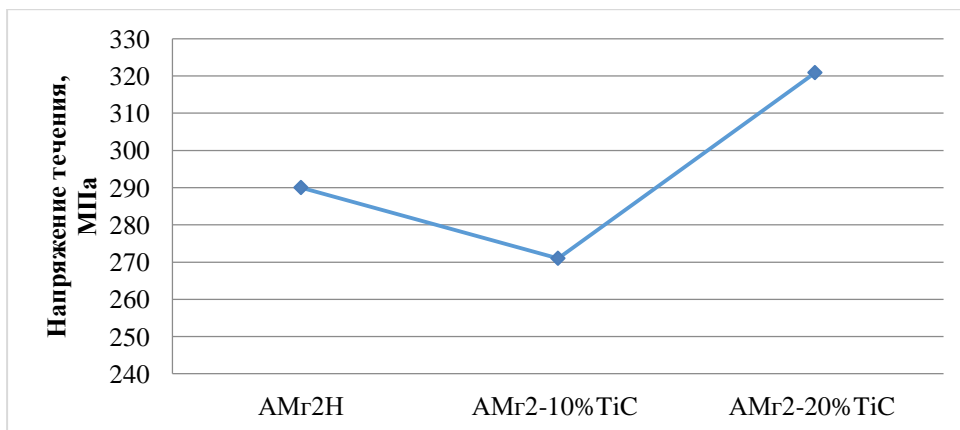


Рис. 3. Предел текучести композиционных материалов на основе AMg2

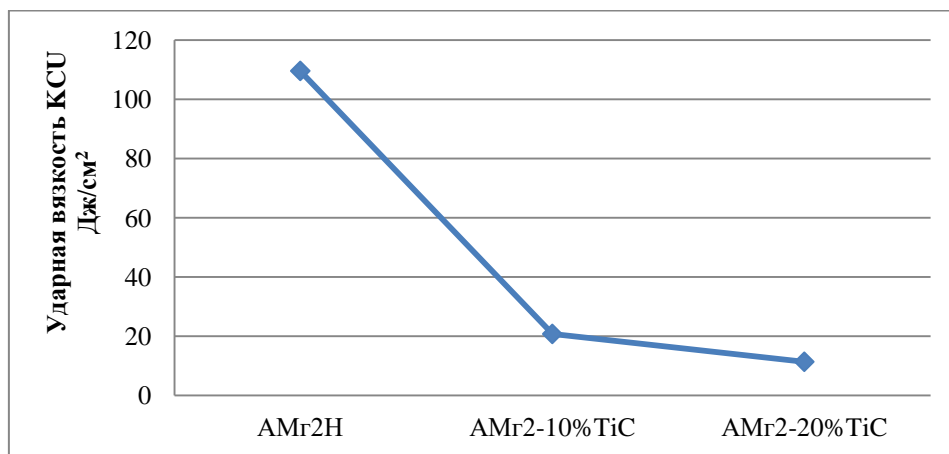


Рис. 4. Ударная вязкость композиционных материалов на основе АМг2

По результатам проведенных исследований установлено, что армирование промышленного сплава АМг2 20 масс. % карбида титана приводит к большему приросту твердости и напряжения течения при сжатии, чем при армировании 10 масс. %. Однако наблюдается значительное увеличение пористости (на 6 %), которая в совокупности с дисперсным армированием приводит к резкому падению показателей ударной вязкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Луц А.Р., Макаренко А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез алюминиевых сплавов. Самара: Машиностроение, 2008. 175 с.
2. Исследование структуры и свойств композиционного материала АМг2 – 20 % TiC полученного методом СВС в расплаве / А.Д. Качура, А.Р. Луц, Э.Р. Умеров, Ю.В. Шерина // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий: сб. статей. Воронеж, 2023. С. 197–202.
3. Preparation and Mechanical Characterization of TiC Particles Reinforced Al7075 Alloy / Prasad S. Krishna, S. Dayanand, M. Rajesh, M. Nagaral, V. Auradi, R. Selvaraj // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 22. Pp. 11–15.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБОНИТРИДА ЦИРКОНИЯ,
ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ**

Кузьменко Е.Д., студент

*Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация
E-mail: kuzmenko70egor@yandex.ru*

Представлены результаты исследования физико-механических свойств инструментальной керамики на основе карбонитрида циркония, консолидированной методом горячего прессования при температуре 2000 °С. Установлена зависимость достигаемых свойств, таких как твердость и критический коэффициент интенсивностей напряжений, от исходного состава и получаемой плотности образцов. Определено, что увеличение содержания нитрида циркония улучшает механические свойства образцов.

Ключевые слова: карбонитрид циркония, твердость, трещиностойкость

**STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF TOOL CERAMICS BASED ON ZIRCONIUM CARBONITRIDE
OBTAINED BY HOT PRESSING METHOD**

Kuzmenko E.D., student

*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
E-mail: kuzmenko70egor@yandex.ru*

The results of a study of the physical and mechanical properties of instrumental ceramics based on zirconium carbonitride, consolidated by hot pressing at a temperature of 2000 °C, are presented. The dependence of the achieved properties, such as hardness and critical stress intensity factor, on the initial composition and the resulting density of the samples has been established. It has been determined that increasing the zirconium nitride content improves the mechanical properties of the samples.

Keywords: zirconium carbonitride, hardness, crack resistance

При разработке инструментальных материалов значительное внимание уделяется ряду свойств, а именно твердости и температуре плавления. Среди применяемых инструментальных материалов следует выделить легированные стали, керметы и керамики. При этом керамика при производстве режущего инструмента может быть применена в виде износостойких покрытий [1]. Следует отметить, что при реализации такой схемы производства инструментальных материалов может возникать ряд проблем, в частности недостаточная адгезия нанесенного керамического слоя со стальной подложкой. Для решения данной проблемы следует изучить перспективы производства цельнокерамического режущего инструмента. При применении керамик на основе карбида и нитрида циркония, спеченных методом горячего прессования, такой инструмент будет сочетать высокие твердость, плотность, температуру плавления и прочность.

В проведенной работе были исследованы керамики следующих составов: 20 масс. % ZrC – 80 масс. % ZrN, 50 масс. % ZrC – 50 масс. % ZrN, 80 масс. % ZrC – 30 масс. % ZrN. Спекание производилось методом горячего прессования при температуре 2000 °С. Измерение плотности образцов осуществлялось гидростатическим взвешиванием (рис. 1).

С увеличением содержания нитрида циркония в исследуемых образцах увеличивалась плотность. Данное увеличение плотности связано с меньшей температурой плавления нитрида циркония по сравнению с карбидом циркония. Для нитрида циркония температура плавления составляет 2980 °С, для карбида циркония 3530 °С [2]. Увеличение содержания компонента с меньшей температурой плавления ускоряет консолидацию, снижая пористость образцов.

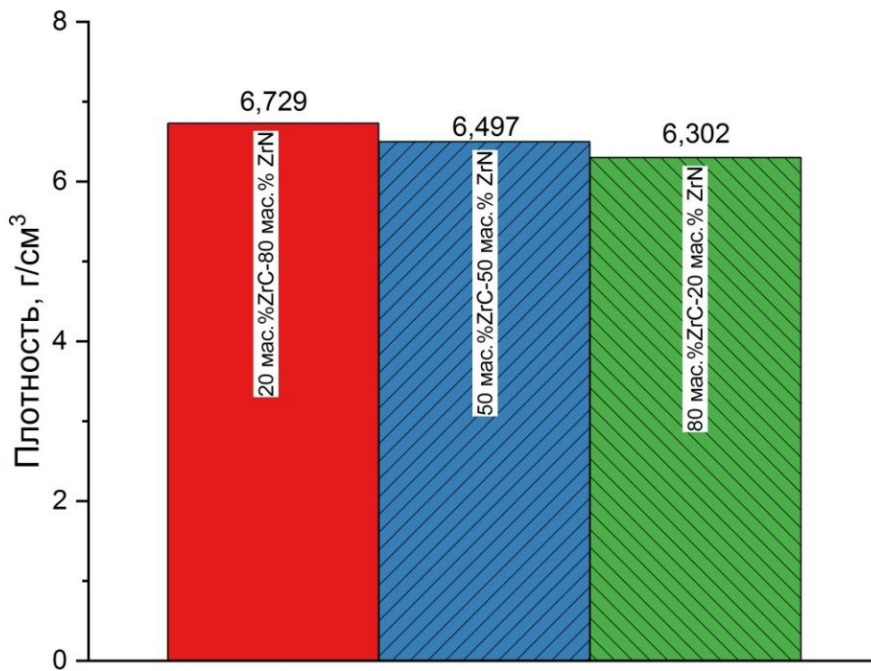


Рис. 1. Плотность исследуемых образцов

В ходе работы были определены механические свойства образцов. Твердость исследуемых образцов определялась на ПМТ-3 по Виккерсу (рис. 2).

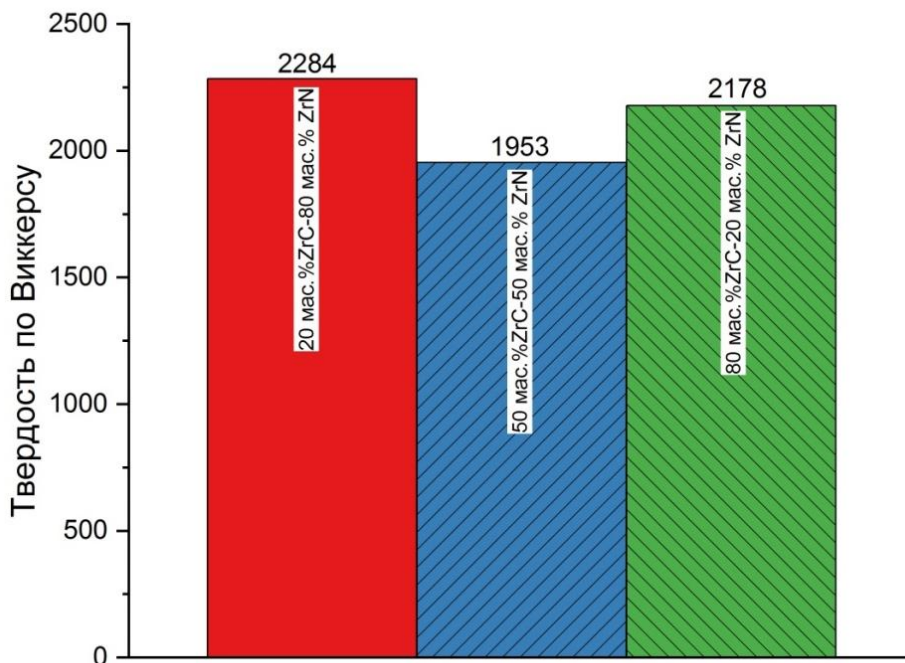


Рис. 2. Твердость исследуемых образцов

Было установлено, что наибольшей твердостью среди исследуемых образцов отличается керамика состава 20 масс. % ZrC – 80 масс. % ZrN. При этом для состава 50 масс. % ZrC – 50 масс. % ZrN наблюдается снижение твердости, плохо коррелирующееся с общей зависимостью от полученной плотности. Методом индентирования с применением модели Лауна были определены критические коэффициенты интенсивностей напряжений, количественно выражающие трещиностойкость [3]. Полученные данные представлены на рис. 3.

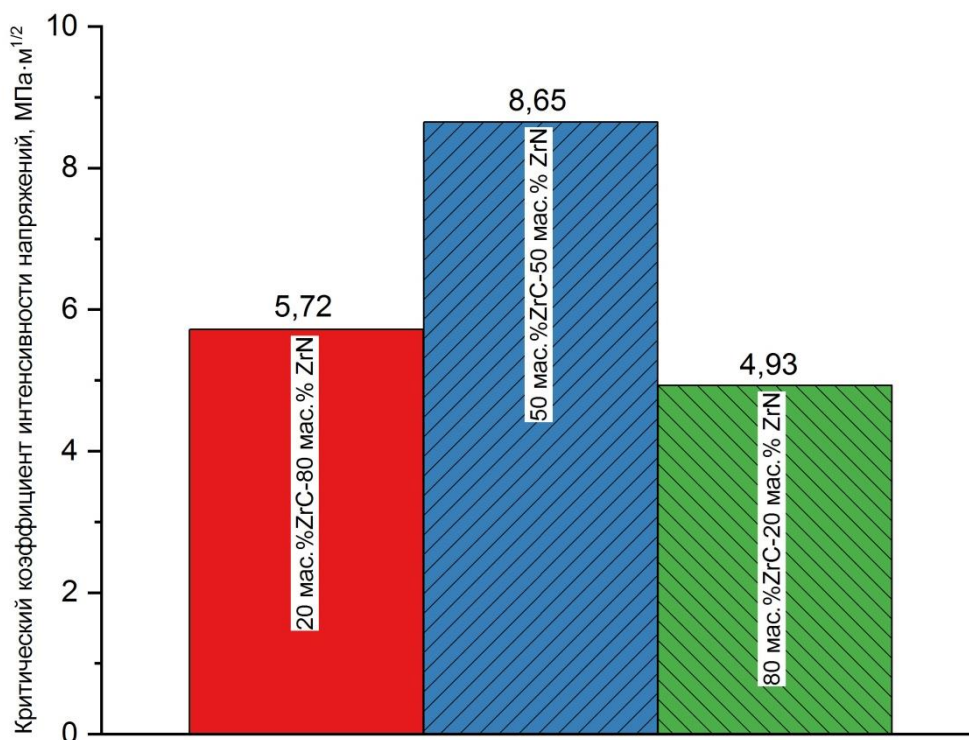


Рис. 3. Критические интенсивности напряжений исследуемых образцов

Было установлено, что наибольшей трещиностойкостью обладает керамика состава 50 масс. % ZrC – 50 масс. % ZrN, при этом наблюдаемое ранее снижение твердости для данного состава керамики хорошо коррелирует с полученным высоким значением критического коэффициента интенсивности напряжений. Использование данной керамики в качестве инструментального материала перспективно при работе в условиях возникновения ударных нагрузок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ul-Hamid A. The effect of deposition conditions on the properties of Zr-carbide, Zr-nitride and Zr-carbonitride coatings: a review // *Materials Advances*. 2020. Vol. 1, Issue 5. Pp. 988–1011. DOI: 10.1039/D0MA00232A.
2. Harrison R.W., Lee W.E. Processing and properties of ZrC, ZrN and ZrCN ceramics: a review // *Advances in Applied Ceramics*. 2016. Vol. 115, Issue 5. Pp. 294–307. DOI: 10.1179/1743676115Y.0000000061.
3. Moradkhani A., Panahizadeh V., Hoseinpour M. Indentation fracture resistance of brittle materials using irregular cracks: a review // *Heliyon*. 2023. 12 p. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19361

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ПЕСЧАНЫХ СТЕРЖНЕЙ НА ПРИМЕРЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ «АППАРАТ НАПРАВЛЯЮЩИЙ» ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Леушин И.О., д.т.н., профессор, Герасимов А.В. [✉], аспирант, Любомиров Д.А., бакалавр

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: gerasimovartem_lp@list.ru

Представлен пример практического применения песчаных стержней, изготовленных при помощи аддитивных технологий при производстве отливок из коррозионностойких сталей. Отмечена актуальность использования аддитивных технологий в литейном производстве при изготовлении отливок ответственного назначения. Выделены проблемы применения печатных стержней. Разработаны мероприятия для повышения качества получаемой продукции.

Ключевые слова: аддитивные технологии, песчаные стержни, отливка, коррозионностойкие стали, аппарат направляющий

THE USE OF ADDITIVE SAND RODS ON THE EXAMPLE OF MANUFACTURING A CASTING “GUIDE DEVICE” MADE OF CORROSION-RESISTANT STEELS

Leushin I.O., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Gerasimov A.V. [✉], PhD student, Lyubomirov D.A., bachelor

NSTU named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: gerasimovartem_lp@list.ru

In this article, the authors present an example of the practical application of sand rods made using additive technologies in the production of castings from corrosion-resistant steels. The relevance of the use of additive technologies in foundry production in the manufacture of castings for responsible purposes is noted. The problems of using printed rods are highlighted. Measures have been developed to improve the quality of the products received.

Keywords: additive technologies, sand rods, casting, corrosion-resistant steels, guide device

На сегодняшний день важным и особенно актуальным вопросом при изготовлении деталей для оборудования, применяемого в различных отраслях промышленности, является получение качественной продукции, особенно если речь идет об отливках ответственного назначения со сложной и нетехнологичной конфигурацией. Например, закрытые рабочие колеса, лопатки газотурбинных двигателей, корпуса насосов, направляющих аппаратов, гребных винтов, работающих в агрессивных средах и требующих от будущей детали наличия определенных свойств [1].

Переход на цифровое описание изделий и появившиеся аддитивные технологии произвели кардинальные изменения в литейном производстве, что особенно наглядно проявилось в высокотехнологичных отраслях промышленности.

Использование аддитивных технологий в литейном производстве позволяет «выращивать» литейные модели и формы, которые невозможно было изготовить традиционными способами, а также значительно сокращает сроки изготовления модельной оснастки. Данный вопрос имеет особое значение в сфере импортозамещения, так как дает возможность быстрого прототипирования [2].

«Аппарат направляющий» (лопаточный отвод) (рис. 1) осуществляет отведение жидкости от рабочего колеса предыдущей ступени и подведение потока к колесу последующей ступени.

Данная конструкция играет одну из ключевых ролей в центробежных установках, скважинных насосах, центробежных компрессорах и является ярким примером сложной отливки ответственного назначения со специальными эксплуатационными свойствами. Это

устройство состоит из двух неподвижных дисков, установленных в корпусе насоса и оснащенных лопатками, похожими на лопасти рабочего агрегата. Изготавливаются в виде одной литой детали преимущественно из серого чугуна, углеродистой или легированной стали в зависимости от свойств перекачиваемой жидкости и скорости потока.



Рис. 1. Деталь «Аппарат направляющий» к ЦНС-240, масса 120 кг, габаритный размер $\varnothing 440 \times 340$

Повышенные требования к точности и чистоте поверхности проточной полости направляющего аппарата и элементов таких установок обусловлены воздействием больших скоростей рабочей жидкости и создаваемого давления, которые ведут к образованию коррозии, абразивному износу и последующему выходу из строя или разрушению.

С точки зрения эксплуатационных свойств в тяжелых средах и обеспечения надежности работы поднимается вопрос о разработке современных технологий изготовления стойких к негативным воздействиям рабочей среды ЦНС и их компонентов, а также подготовке самого производства. Выбор метода изготовления при этом здесь играет определяющую роль и влияет на технико-экономические показатели [7].

Сравнительный анализ различных способов литья стал основой перехода к гибкой и распространенной технологии формовки по ХТС процессу. Для крупных стальных отливок ответственного назначения такой метод можно считать наиболее подходящим, так как соотношение «цена – качество» для такой отливки будут наилучшими. В состав холодно твердеющих смесей входит кварцевый песок, смола и отвердитель, смеси упрочняются в технологической оснастке без дополнительных внешних воздействий.

Главными преимуществами технологии являются высокая прочность и термостойкость формы, неограниченное время хранения форм, негигроскопичность смеси. Параметры технологического процесса регулируются в широких пределах в зависимости от условий производства и характеристик оборудования. Отсутствует необходимость создания и эксплуатации сложного и дорогостоящего смесеприготовительного отделения, системы контроля и стабилизации технологических свойств смеси, ее готовят в простых смесителях непрерывного действия.

Модельная оснастка может быть выполнена из различных материалов, она достаточно проста и изготавливается преимущественно послойным фрезерованием на станках с ЧПУ.

Несмотря на широкий спектр преимуществ данной технологии, анализ конструктивных особенностей, технологичности изделия «Аппарат направляющий» и технических требований к нему показал, что создание внутренней полости будущего изделия по ХТС процессу было невозможным. Лопатки внутреннего пояса были бы тонкими, со сложной конфигурацией, с отсутствием линии разъема и направления протяжки. Модельная оснастка имела бы сложную конструкцию стержневых ящиков, а точность сборки была бы потеряна из-за большого количества стержневых элементов. Сохранение конфигурации профиля лопаток и качество их поверхности являются важными задачами литейщика, так как такая конструктивная особенность «Аппарата направляющего» обеспечивает требуемые характеристики – от направления потока рабочей жидкости до КПД, стойкости и срока службы насосного оборудования.

Распространение в литейном производстве аддитивных технологий позволило решить вопрос со сложной конфигурацией внутренней полости стержня будущей детали. Мы применили стержень, изготовленный методом струйной печати на 3D-принтере, который основан на послойном нанесении песка, предварительно смешанного с отвердителем, а также нанесении в необходимых местах связующего материала (смолы) с помощью многоструйной печатающей головки. Несвязанный песок затем удаляется пылесосом. Эта технология дает следующие преимущества:

- позволяет изготавливать литейные стержни любой сложности;
- исключает изготовление оснастки для литейных стержней и моделей;
- не требует постобработки;
- сокращает длительность технологической подготовки производства;
- повышает точность отливок за счет возможности объединения стержней в единый стержневой блок;
- не требует нанесения литейных уклонов.

Песок, который остался несвязанным, может быть добавлен к «чистому» в качестве вторичного, что позволяет уменьшить его расход. По совокупности оптимальных характеристик с точки зрения исключения применения технологической оснастки и сокращения сроков подготовки изготовления деталей прототипа стержня, а также повышения их качества был выбран аддитивный метод производства, основанный на Binder Jetting/Ink-Jet-технологии [5]. Для сложных изделий, таких как «Аппарат направляющий», этот способ наиболее рационален, так как применяется технология прямого изготовления литейной формы из материалов, традиционно используемых в литейном производстве.

При поддержке ООО «Проектно-инжиниринговая компания» была разработана и изготовлена опытная серия печатных песчаных стержней для производства отливки «Аппарат направляющий» методом литья (рис. 2) в рамках опытных работ на базе ООО «НПП «СовТехЛит».



Рис. 2. Аддитивный песчаный стержень для производства отливки «Аппарат направляющий» методом литья

- Разработка печатного 3D-стержня включала в себя сложный комплекс мероприятий:
- анализ технологичности изделия;
 - выбор режимов печати для создания оптимальной прочности и минимальной газотворности стержня;
 - создание сотовой структуры и несвязанных полостей для осуществления газопроницаемости стержня;
 - обеспечение достаточных толщин стенок, контактирующих с металлом;
 - проектирование транспортировочных полостей.

При изготовлении песчаного печатного стержня очень важно учитывать свойства применяемого сплава. В случае производства отливок ответственного назначения чаще всего применяют легированные сплавы со специальными свойствами, что создает дополнительные сложности в производстве из-за высоких температур при расплавлении и заливке, химического взаимодействия с материалом формы и стержней.

Химический состав хромоникельмолибденовой литейной коррозионностойкой кислотоустойчивой жаропрочной стали аустенитного класса 12X18H12M3TЛ приведен в таблице. Применяется при изготовлении деталей, устойчивых к воздействию сернистой кипящей, фосфорной, муравьиной, уксусной и других кислот. Детали из данного материала способны длительное время работать под нагрузкой при температурах до +800 °С с интервалом температур рабочей среды от –190 до +600 °С без ограничения номинального давления. Не подвержена межкристаллитной коррозии при температуре до +800 °С, что и требовалось заказчику в соответствии с техническим заданием чертежа, заложенным на этапе конструирования.

Химический состав коррозионностойкой стали по ГОСТ 977-88 [6]

Марка материала	Массовая доля элемента, %											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al	S	P
12X18H12M3TЛ	н.б. 0,10	0,50– 0,90	1,3– 1,7	18,0– 19,0	12,0– 13,0	3,3– 4,0	–	5хС (н.б. 0,7)	1,0– 1,5	0,04– 0,06	н.б. 0,030	н.б. 0,035

Литейные свойства хромоникелевых сталей обусловлены, прежде всего, их жидкотекучестью, что зависит от химического состава сталей, перегрева выше температуры ликвидуса и других факторов. При изготовлении отливок из хромоникелевых сталей желательно металл подавать сифоном и путем соответствующей установки питателей обеспечивать равномерное и спокойное заполнение литейной формы [3].

Сложности при производстве связаны с образованием различных литейных дефектов, реже встречающихся в углеродистых сталях (газовая и усадочная раковина, пористость, трещина, пригар, спай, неметаллические включения), которые нарушают сплошность и существенно снижают уровень механических и эксплуатационных свойств деталей.

С учетом описанных ранее факторов была разработана литейная технология, состоящая из нескольких уровней и заворотов литниковых ходов, что позволило погасить скорость потока металла и заполнить полость формы сифоном. Отливка в 3D с литейной технологией представлены на рис. 3. Питание отливки осуществляли овальными и отводными прибылями с экзотермическими вставками. Расположение в местах образования температурных узлов и дефицита металла обеспечивалось за счет усадки сплава и утяжки объема металла равномерно размещенными лопастями. Результаты компьютерного моделирования затвердевания и симуляции заливки сплава подтвердили правильность принятых решений.

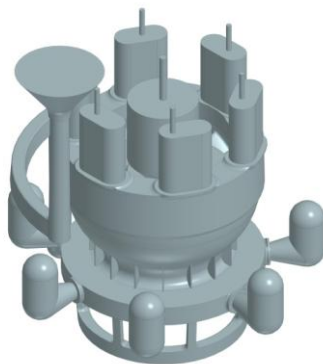


Рис. 3. Отливка «Аппарат направляющий» с литейной технологией в 3D

С учетом небольшой толщины стенок лопаток и сложной конфигурации отливки необходимо было назначить оптимальный температурный режим заливки расплавом, так как чрезмерно высокая температура непременно привела бы к образованию поверхностных дефектов, а низкая – к недоливам, спаям и волнистости. Температура начала заливки была назначена в интервале 1600–1610 °С, скорость заливки составила 6–8 кг/с при металлоемкости формы 370 кг жидкой стали.

Технология изготовления отливки «Аппарат направляющий» с применением аддитивных песчаных стержней представляет собой комбинацию хорошо известного и проверенного способа изготовления отливок литьем в формы из ХТС, совмещенного с методом 3D-печати песком. Печатью изготавливаются только элементы, которые невозможно реализовать действующей формовкой или их применение необоснованно.

Для повышения качества стальной отливки особенно важно подготовить печатный стержень к заливке: произвести первичное высушивание для удаления влаги и максимального упрочнения. Для этого печатный стержень тщательно обдувается от остатков несвязанной смеси и помещается на 4 часа в печь при температуре 80–100 °С.

Покраска печатного стержня для отливки «Аппарата направляющего» производилась противопригарным покрытием Zirkofluid 6672 пульверизатором в два слоя с вязкостью 13–16 с по вискозиметру. Сушка каждого слоя покрытия осуществлялась на воздухе. Перед постановкой в форму стержни выдерживались 8 часов в электрической печи при температуре 80 °С, после чего собранная форма на поддоне перемещалась на плац, где устанавливалась заливочная воронка и нагружалась для последующей заливки жидким металлом. Металл из печи выпускался с перегревом для компенсации потерь температуры в ковше при транспортировке, температура металла измерялась термопарой погружения, чтобы заливка была произведена точно в назначенном интервале.

Технология струйной печати является современным вариантом классических методов изготовления стержней для литейного производства и имеет высокий потенциал для применения и дальнейшего развития. Практический опыт показал, что при правильном проектировании и учете особенностей процессов можно объединять ХТС формы и печатные стержни при изготовлении литья. Ценностью данной технологии является использование комбинированных форм из элементов, изготовленных разными способами формовки, что не только позволяет уменьшить влияние печатного стержня на отливку, но и удешевляет ее себестоимость за счет применения печатных элементов только в случаях необходимости воспроизведения сложной конфигурации.

На рис. 4 изображена отливка «Аппарат направляющий» по разработанной технологии литья в комбинированные формы.



Рис. 4. Отливка «Аппарат направляющий» по технологии заливки в комбинированные формы на базе ООО «НПП «СовТехЛит»

Полученная отливка 3-й группы по ГОСТ 977-88 выполнена из стали марки 12X18H12M3TЛ и имеет черновую массу 165 кг. Точность отливки 11-0-0-11 ГОСТ Р 53464-2009 по результатам замеров соответствует требованиям НТД.

Влияние металла на печатный стержень по «фуран процессу» было предсказуемо негативным. Фурановые смолы обладают плохой устойчивостью к высоким температурам, что привело к таким дефектам, как пригорание формовочной смеси.

В зависимости от требуемых свойств литейной формы используются различные виды песка. Наиболее распространенный материал для создания полимерных форм – это кварцевый песок. Высокий коэффициент температурного расширения кварцевого песка в диапазоне температур от 20 до 800 °С способствует раннему разрушению и образованию прожилков во время литья, что мы и наблюдаем на рис. 5.



Рис. 5. Дефект литья в виде просечек

В соответствии с ГОСТ 19200-80 «Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов» просечка – это дефект в виде невысоких прожилков на поверхности отливки, возникших вследствие затекания металла в трещины на поверхности формы или стержня. Указанные дефекты чаще встречаются в крупногабаритных чугунных и стальных высоколегированных нержавеющих отливках, для которых требуется высокая температура заливки формы расплавом, и относятся к группе «дефекты поверхности». В нашем случае дефект оказался устранимым. При помощи воздушной машинки с гибким валом была произведена зачистка пораженных труднодоступных поверхностей в соответствии с требованием заказчика.

Разработанная технология позволила нам создать уникальное по своей конструктивной особенности изделие, и несмотря на затраты, связанные с доводкой и исправлением, является обоснованно целесообразной. Другие способы производства сравнительно более затратны и трудоемки с точки зрения изготовления опытной единичной продукции.

Предотвратить химическое, термическое и механическое взаимодействие отливки со стержнем практически невозможно, поэтому задача получения чистого литья должна решаться не путем предотвращения образования дефектов, а созданием условий, обеспечивающих или легкое отделение их от отливок, или ослабление последствий взаимодействия. Изучение и поиск доступных синтетических огнеупорных составов наполнителя с целью получения более высокого качества литой поверхности без дефектов при использовании сплавов с высокой температурой заливки является актуальной задачей. Высокая степень огнеупорности, минимальный коэффициент теплового расширения наполнительных материалов позволит улучшить качество поверхности отливок, изготовленных из агрессивных сплавов.

В настоящей статье описан наиболее экономичный, производительный и нетрудоемкий комбинированный способ, обеспечивающий приемлемый уровень качества изготавливаемых деталей. В том числе приведены результаты отработки технологии изготовления отливки из коррозионностойкой стали 12X18H12M3TЛ путем заливки в формы из ХТС с использованием печатного стержня на примере отливки «Аппарат направляющий».

Полученные результаты могут обеспечить снижение зависимости российских компаний от зарубежной продукции. Отработанные технологии позволят запустить в производство детали, недоступные для закупки за рубежом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнов В.В., Барзали В.В., Ладнов П.В. Перспективы развития аддитивного производства в российской промышленности. Опыт ФГБОУ УГАТУ // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2 (14). С. 23–27.
2. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во политехнического университета, 2013.
3. Колганов К.А., Микрюков И.В., Марков А.С. Разработка технологии изготовления деталей/компонентов двигателя внутреннего сгорания с применением аддитивных методов производства // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т. 2. Вып. 3. С. 166–184. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-3-166-184.
4. Арсов Я.Б. Стальные отливки. М.: Машиностроение, 1977. 176 с.
5. Баева Л.С., Маринин А.А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 1. С. 7–12. URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v17_1_n56/07_12_baeva.pdf
6. ГОСТ 977-88. Отливки стальные. Общие технические условия.
7. Двинин А.А., Безус А.А. Типовые центробежные насосы в нефтяной промышленности: учеб. пособие. Тюмень: ТюмГНГУ, 2010.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ В АВИАСТРОЕНИИ ИЗ АРМИРОВАННОГО ЦЕЛЬНОТКАНОГО КОМПОЗИТА

Малаева П.В., студент

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация
E-mail: malaeva.polina@bk.ru*

Рассмотрена технология армирования цельнотканого композита с использованием 3D-ткачества. В работе приведены основные преимущества и недостатки данного метода. Также рассмотрен процесс изготовления лопаток вентилятора воздушного судна с применением новой технологии. Кроме того, проведено сравнение характеристик обычных титановых лопаток и лопаток, изготовленных из армированного композита.

Ключевые слова: композитный материал, 3D-ткачество, лопатки двигателя самолета

MANUFACTURING OF PARTS IN THE AIRCRAFT INDUSTRY FROM REINFORCED SOLID-WOVEN COMPOSITE

Malaeva P.V., student

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation
E-mail: malaeva.polina@bk.ru*

The article shows the technology of reinforcement of an all-woven composite using 3D weaving. The paper presents the main advantages and disadvantages of this method. The process of manufacturing aircraft fan blades using new technology is also considered. In addition, the characteristics of conventional titanium blades and blades made of reinforced composite were compared.

Keywords: composite material, 3D weaving, fan blades

Проблема, связанная со снижением массы самолета, остается актуальной в авиастроении и по сей день. Снижение веса является важным фактором при проектировании и изготовлении деталей для авиационной промышленности. Инженеры стремятся уменьшить массу воздушного судна с целью снижения потребления топлива двигателем, что приводит к сокращению выбросов оксида азота в атмосферу. Существует ряд методов, способствующих достижению данной цели. Первым из них является использование современных материалов, таких как композиты, среди которых наиболее распространены углепластик и стеклопластик в области авиастроения. Вторым способом является внедрение новых технологий производства, позволяющих снизить массу изделий. Эти технологии включают в себя аддитивное производство: 3D-печать, лазерная сварка, селективное сплавление металлических порошков, спекание высокотемпературных пластиковых материалов, изготовление деталей из керамических порошков и лазерная наплавка металлических порошков. Также существует такая технология, как 3D-ткачество, способствующая уменьшению массы воздушного судна, сокращению времени производства и повышению производительности.

При производстве деталей с применением технологии 3D-ткачества используются композиционные материалы. Композитный материал (КМ) представляет собой составной материал, созданный из двух или более компонентов с различными физическими и химическими свойствами, которые вместе образуют новый материал с уникальными характеристиками.

Использование композиционных материалов вместо металлов обладает рядом преимуществ, таких как уменьшение массы конструкции, что приводит к снижению расхода топлива, повышенная прочность и жесткость, улучшенная химическая и атмосферная стойкость, а также более высокая технологичность и упрощение процесса сборки.

Большинство полимерных композиционных материалов имеет слоистую структуру, образованную слоями волокнистых материалов, накладываемыми друг на друга. Этот тип композита характеризуется низкой межслоевой прочностью и устойчивостью к ударам. Для преодоления этих недостатков применяют цельнотканую объемно-армирующую преформу (каркас). Технология объемного ткачества – 3D-ткачество – используется для производства цельнотканых преформ [1, 2]. Это относительно новая и сложная технология, которая позволяет создавать объемные ткани большой толщины, где нити могут быть направлены не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости (рис. 1).

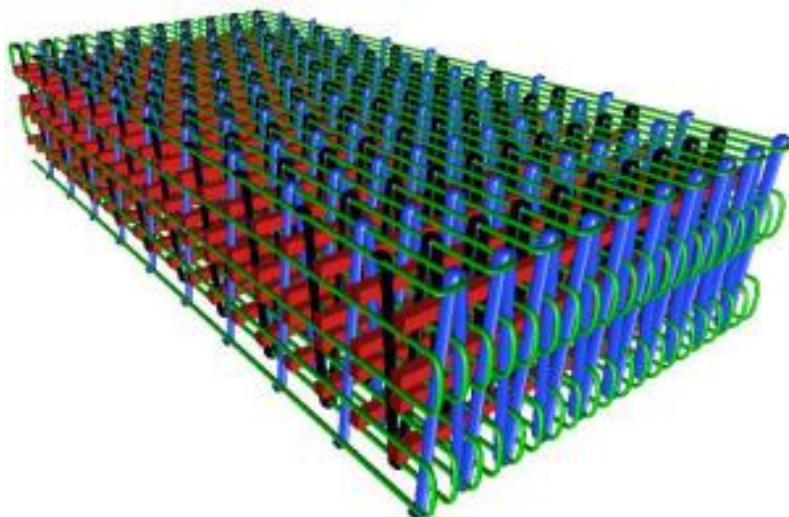


Рис. 1. Модель трехмерной армирующей структуры

Эта современная технология при производстве деталей по сравнению с традиционными композитами может предотвратить расслоение материала. Наличие армирующих волокон в третьем направлении предотвращает распространение микротрещин, возникающих в зонах дефектов, и исключает расслоение трехмерных тканей, в отличие от композитов, изготовленных традиционным способом. Автоматизированный процесс производства 3D-тканей в одной операции обеспечивает равномерное соотношение ниток и направленность в системе, а также исключает ручной труд, что улучшает качество, снижает возможность ошибок и себестоимость готового изделия.

Зарубежные исследования в области проектирования, производства и изучения свойств тканых объемно-армирующих преформ и материалов на их основе проводятся различными компаниями и институтами, такими как Albany Engineered Composites (USA) Biteam AB (Швеция). Также существует российская компания, которая выпустила автоматизированный ткацкий комплекс (рис. 2), изготавливающий 3D-преформы. Он может ткать преформы, у которых размеры могут достигать в толщину от 2 до 200 мм, а в ширину – от 10 до 600 мм. В них содержится от 20 до 50 % волокна в объеме, что делает их прочными и устойчивыми. Также процентное содержание углерода по осям армирования может быть различным в зависимости от требуемых характеристик изделия. Разнообразие параметров позволяет создать преформы, которые отвечают требованиям конкретного проекта и обеспечивают высокое качество изготавливаемого изделия.

Трехмерные преформы, полученные методом 3D-ткачества, могут иметь различную толщину, а именно могут быть тонкостенными и толстостенными. Тонкостенные 3D-преформы могут представлять собой легкие, пустотелые панели или тонкостенные профили, которые могут менять свой профиль, структуру и толщину по длине изделия. Толстостенные (полнотелые) преформы представляют собой объемную армирующую структуру и могут быть созданы в форме, соответствующей размерам и форме будущего композитного изделия с армирующими нитями, расположенными в трех перпендикулярных направлениях, образуя ортогональную структуру армирования.



Рис. 2. Автоматизированный ткацкий комплекс

Отмечается, что возможности 3D-ткачества позволяют разрабатывать новые типы материалов. Регулирование толщины и свойств материала путем распределения нитей позволяет создавать материалы с необходимыми характеристиками для конкретных производственных задач. Эта технология позволяет не только создавать 3D-ткани, но также изготавливать объемные преформы (рис. 3), программно управляя внутренними элементами конструкции на станках ЧПУ.



Рис. 3. Изготовление преформ из углеродного волокна

Рассматривая на примере изготовления лопаток вентилятора двигателя, можно выделить основные этапы этой технологии. В начале происходит создание армированного полотна, применяя ткацкие станки, которые адаптированы под производство объемных изделий, изменяющихся в процессе ткачества по ширине, толщине и профилю. До того как происходит запуск станка, выполняется крутка, трощение и перемотка нитей с требуемым сочетанием и пропорциями. Нити наматывают на бобины, которые устанавливают на специализированную оснастку – шпулярник. После этого уже запускают процесс создания полотна, которое в дальнейшем помещают в специализированную комнату, где раскраивают с использованием цифрового режущего плоттера. Для этого в компьютер загружают программу, определяющую контуры будущей лопатки двигателя, проверяют корректное размещение материала. Плоттер автоматически выбирает оптимальный режущий инструмент и выполняет раскройку, предотвращая попадание посторонних материалов на полотно, что может негативно повлиять на качество заготовки. Сформированная преформа укладывается и пропитывается связующим под давлением в специальной пресс-форме, приобре-

тая необходимую прочность и форму под воздействием температуры. После этого заготовка проходит этап механической обработки. Завершающим этапом является приклеивание титановой пластины как защитной кромки, обеспечивающей дополнительную прочность и защиту лопасти вентилятора от ударов при столкновении с посторонними объектами.

Основным преимуществом 3D-тканых лопаток является их высокая прочность и жесткость, которая позволяет им выдерживать большие нагрузки во время работы турбины. Кроме того, благодаря сложной геометрии 3D-тканые лопатки обладают улучшенными аэродинамическими характеристиками, что способствует увеличению эффективности работы двигателя. В целом 3D-тканые лопатки турбин по сравнению с обычными титановыми лопатками обладают рядом преимуществ, таких как повышенная производительность, прочность и технологичность, что делает их привлекательным вариантом для использования в авиационной и энергетической промышленности. Однако следует учитывать высокую стоимость их производства и возможность окупаемости в долгосрочной перспективе [3].

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что 3D-ткачество имеет огромный потенциал для применения в авиастроении. С помощью этой технологии можно создавать легкие и прочные компоненты для самолетов, что позволит снизить вес воздушных судов и улучшить их эффективность.

Одним из преимуществ 3D-ткачества является возможность создания сложных и точных деталей, которые трудно или невозможно изготовить с использованием традиционных методов производства. Это позволит разработчикам и инженерам создавать оптимизированные и инновационные конструкции самолетов.

Также использование 3D-ткачества позволит сократить время и затраты на производство компонентов, так как процесс изготовления при помощи этой технологии гораздо более быстрый и эффективный, чем традиционные методы литья и формования.

В целом применение 3D-ткачества в авиастроении может привести к созданию более легких, прочных и экономичных воздушных судов, что в свою очередь приведет к повышению безопасности полетов, снижению затрат на обслуживание и ремонт, а также уменьшению вредного влияния авиации на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мартынова А.А., Слостина Г.Л., Власова Н.А. Строение и проектирование тканей: учебник. М.: МГТА, 1999. 434 с.
2. Богомолов П.И., Козлов И.А., Бируля М.А. Обзор современных технологий изготовления объемно-армирующих преформ для перспективных композиционных материалов // Техно-технологические проблемы сервиса. 2017. № 1. С. 22–27.
3. Сергеев В.Т., Николаев С.Д. Анализ структуры многослойных комбинированных тканей для многофункциональных композитов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. Иваново, 2017. № 1. С. 302–305.
4. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хиллов П.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 9. С. 77–85.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ И ПОНИЖЕННЫХ СВОЙСТВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ СТАЛИ 30X13

Муратов В.С.¹, д.т.н., профессор, **Морозова Е.А.**¹, к.т.н., доцент,
Якимов Н.С.², к.т.н., ведущий инженер

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² ОАО «Авиаагрегат», г. Самара, Российская Федерация

E-mail: andrej.bakin2013@yandex.ru

Отработаны режимы упрочняющей термической обработки деталей из коррозионностойкой жаропрочной стали 30X13, обеспечивающие твердость 48–49 HRC (температура закалки 1050 °С, время выдержки 80 минут, охлаждение в масле; отпуск 200 °С, 180 минут, охлаждение на воздухе). Изучены причины образования трещин при термической обработке, обусловленные повышенной локальной пористостью стали.

Ключевые слова: авиационная техника, коррозионностойкая сталь, термическая обработка, структура, свойства, дефекты

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF DEFECTS AND REDUCED PROPERTIES DURING THE HEAT TREATMENT OF AIRCRAFT PARTS MADE OF 30X13 STEEL

Muratov V.S.¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Morozova E.A.**¹, Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, **Yakimov N.S.**², PhD in Engineering Sciences, lead engineer

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

² JSC “Aviaagregat”, Samara, Russian Federation

E-mail: andrej.bakin2013@yandex.ru

The modes of hardening heat treatment of parts made of corrosion-resistant heat-resistant steel 30X13 have been worked out, providing a hardness of 48–49 HRC (quenching temperature 1050 °C, holding time 80 minutes, cooling in oil; tempering 200 °C, 180 minutes, air cooling). The causes of crack formation during heat treatment due to increased local porosity of steel have been studied.

Keywords: aviation technology, corrosion-resistant steel, heat treatment, structure, properties, defects

Для создания нового парка авиационных машин Ил-76Мд-90А, SSJ-NEW, ТВРС-44 «Минога» используются стали, успешно работающие в различных агрессивных условиях [1], что обеспечивает надежность и безопасность полетов и перевозок. В частности, применяются специальные коррозионностойкие жаропрочные стали 20X13, 30X13, 40X13 [2, 3], которые относятся к мартенситному классу и из них изготавливают различные детали, работающие на износ в слабоагрессивных средах до 450 °С.

В настоящее время нагрузки на авиационные изделия существенно возрастают, поэтому безопасность полетов напрямую зависит от технологии изготовления сплавов и деталей, которая является многостадийной. При изготовлении слитка и последующего сортамента в материале возникают ликвационные зоны и формируются неметаллические включения, которые в дальнейшем могут приводить к зарождению различных дефектов. Их выявление на стадии изготовления деталей позволяет предотвратить разрушения при эксплуатации изделия, а также выявить характер и причины зарождения дефектов, что дает возможность корректировать технологические процессы изготовления деталей и исключать образование новых подобных дефектов.

Целью исследований является отработка режимов термической обработки и выявление причин появления дефектов деталей, изготавливаемых из горячекатаного круга коррозионностойкой жаропрочной стали 30X13.

Исследования выполнены на горячекатаном круге из коррозионностойкой стали 30X13, изготовляемом на предприятии ОАО «ИЖСТАЛЬ» г. Ижевск. Диаметр круга равен 65 мм. Химический состав стали 30X13 представлен в таблице и соответствует ТУ 14-1-377-72 и ГОСТ 2590-2006. Термическая обработка изделий проводилась в печах (ПШ-1, ПШ-45), исследование микроструктуры осуществлялось с помощью микроскопа Olympus GX71. Для определения твердости были использованы метод Бринелля (ГОСТ 9012-59, ИСО 410–82) и метод Роквелла (ГОСТ 9013-59, ИСО 6508-86). Химический состав материала определялся на оптико-эмиссионных установках Q8 MAGELLAN и S5 Solaris CCD Plus согласно ГОСТ Р 54153-2010 «Сталь. Метод атомно-эмиссионного спектрального анализа».

Химический состав стали 30X13 (масс. %)

Элемент	C	Mn	Cr	Si	Ni	S	P
Содержание	0,30	0,43	12,2	0,27	0,10	0,017	0,013

В условиях АО «Авиаагрегат» (г. Самара) исследовались заготовки горячекатаного круга в состоянии поставки (подвергнуты отжигу). Определены: балл зерна – 5 и твердость 152-170 НВ. В круге присутствовали ликвационный квадрат 1 балла, центральная пористость 1 балла; отсутствовали – подсадочная ликвация, подкорковые пузыри, краевая пятнистая ликвация, межкристаллитные трещины.

При изготовлении деталей «Втулка» реализовывались два варианта упрочняющей термической обработки. Первый вариант: термическая обработка в контейнере с подачей аргона проводилась на окончательно изготовленных деталях с припуском под шлифование (имеют переменный наружный диаметр 58,5–65 мм, внутренний диаметр 47 мм). Второй вариант – обработка заготовок длиной 160 мм (диаметр 65 мм, внутренний диаметр 45 мм), из которых затем изготавливали четыре втулки. Режим термической обработки: температура закалки 1050 °С, время выдержки 30 минут (первый вариант) и 70 минут (второй вариант), охлаждение в масле; температура отпуска 220 °С, время выдержки 180 минут, охлаждение на воздухе.

При термической обработке по второму варианту были получены несоответствия по твердости – 45–47 HRC вместо требуемой 48–53 HRC. Корректировка режима термической обработки: увеличение времени выдержки при закалке до 80 минут и снижение температуры отпуска до 200 °С позволила достигать требуемых значений твердости в 48–49 HRC. При этом для повышения прокаливаемости применялась специальная оснастка, позволяющая индивидуально располагать заготовки в охладителе.

Микроструктура стали 30X13 после используемых режимов термической обработки представляет собой мартенсит отпуска (рис. 1).



Рис. 1. Микроструктура стали 30X13 после упрочняющей термической обработки (X500)

После упрочняющей термической обработки на деталях были выявлены продольные прямолинейные и ветвистые трещины. На рис. 2, *а* показаны прямолинейные трещины на поверхности детали, а на рис. 2, *б* – трещины с ветвистым строением.

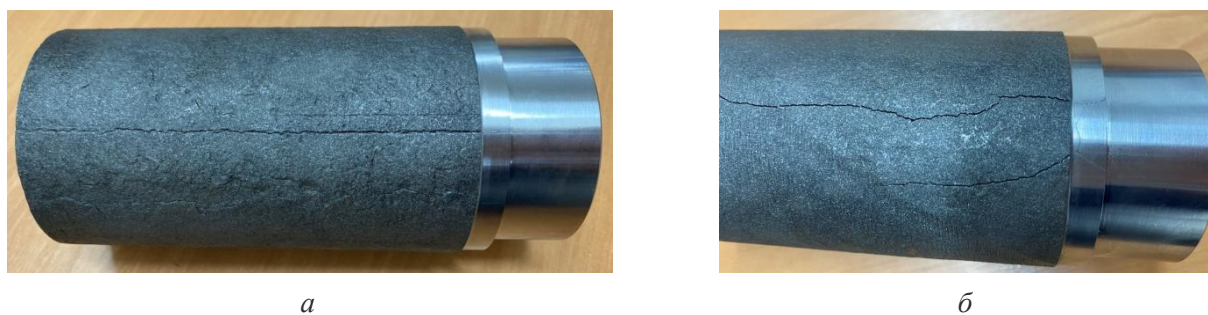


Рис. 2. Трещины на поверхности деталей

Анализ микрошлифов, вырезанных из зон с трещинами, установил их размерные параметры: рис. 3, *а* – глубина 1,8–4,0 мм; рис. 3, *б* – раскрытие на микрошлифе 0,13–0,22 мм.

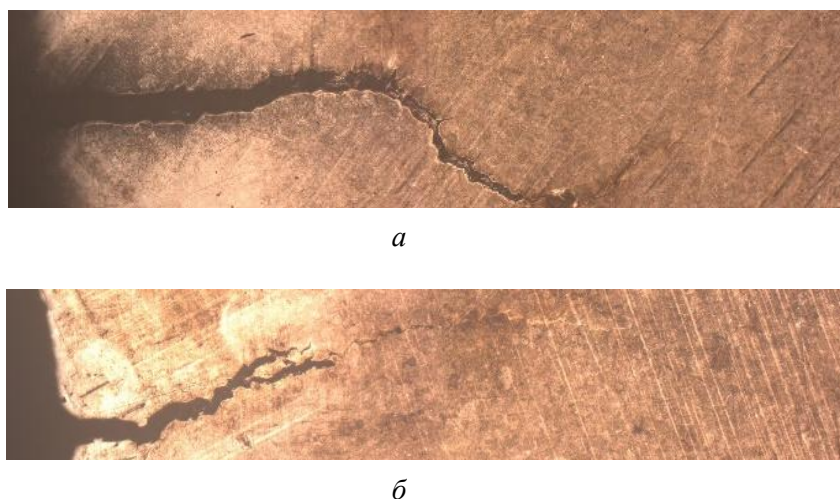


Рис. 3. Внешний вид трещин на микрошлифах (X50)

Установлено, что трещины развиваются от торца в глубь детали по границам зерен и имеют на них более тонкое строение (рис. 4, *а*). В поперечном сечении трещины имеют зигзагообразный вид и выходят на поверхность микрошлифа небольшими участками (рис. 4, *б*). В областях зарождения и развития трещин обнаружены многочисленные поры (рис. 5).

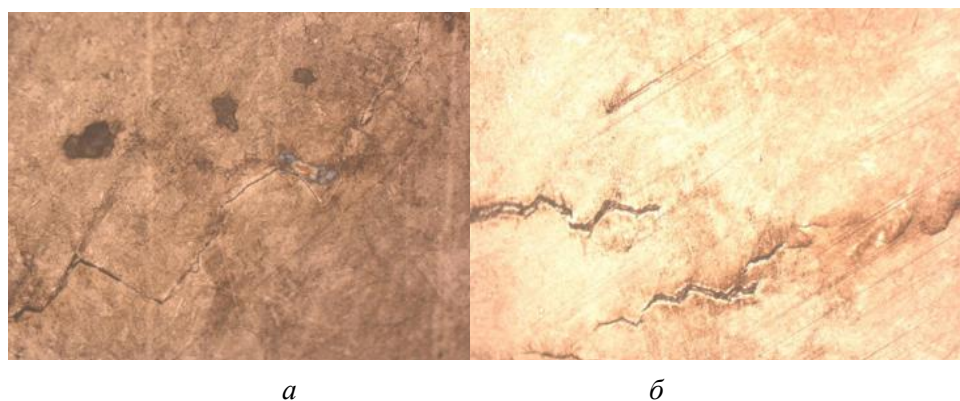


Рис. 4. Развитие трещин по границам зерен (*а*) и выход на поверхность деталей (*б*)

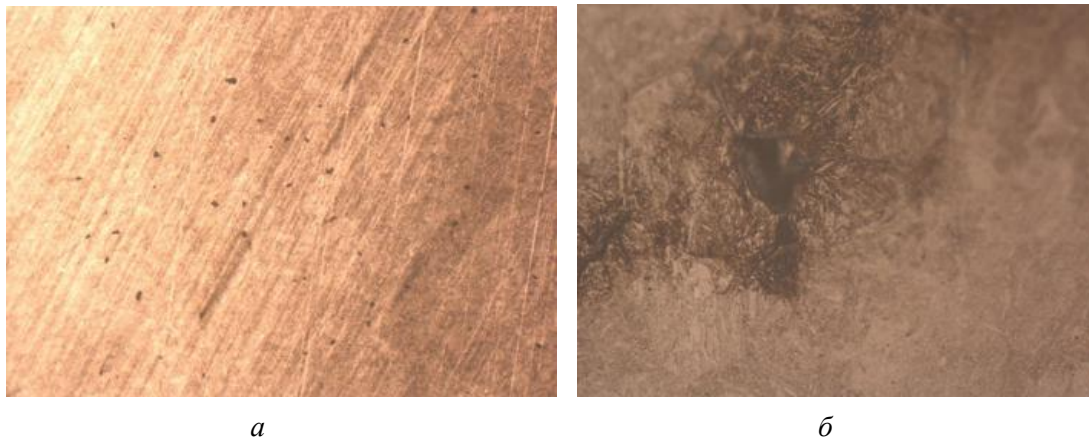


Рис. 5. Поры на микрошлифе стали (Х50) (а) и на границах зерен (Х500) (б)

Предложен режим термической обработки деталей авиационной техники из стали 30Х13 (температура закалки 1050 °С, время выдержки 80 минут, охлаждение в масле; температура отпуска 200 °С, время выдержки 180 минут, охлаждение на воздухе), обеспечивающий требуемый уровень твердости – 48-49 НРС.

Причиной образования трещин при термической обработке является их зарождение в участках стали с повышенной пористостью, дальнейшее развитие по границам зерен и выход на поверхность под воздействием закалочных напряжений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) / Е.Н. Каблов, М.М. Бакрадзе, В.И. Громов, Н.М. Вознесенская, Н.А. Якушева // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11.
2. Ивашко В.В. Исследование влияния режимов нагрева на структуру и свойства нержавеющей стали 20Х13 // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. 2015. № 3. С. 45–48.
3. Kulkarni S., Srinivas P., Biswal P.K., Balachandran G., Balasubramanian V. Improvement in mechanical properties of 13Cr martensitic stainless steels using modified heat treatments. In: Proceedings of the 28th ASM Heat Treating Society Conference. Detroit, 2015. Pp. 335–341.

УДК 621.791.011

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛИ 316L

Наурзалинова Л.К. ✉, студент, Горунов А.И., д.т.н., профессор, Романова А.М., аспирант

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация*

E-mail: linara0101@mail.ru

Прямое лазерное нанесение металла – это метод аддитивного производства, при котором металлический порошок плавится лазерным излучением и наносится слой за слоем, создавая трехмерный металлический объект. В данном исследовании представлен сравнительный анализ структуры стали 316L с использованием метода прямого лазерного нанесения металла. Исследуется влияние мощности лазерного излучения на формирование структуры стали.

Ключевые слова: прямое лазерное нанесение металла, структура стали, мощность лазерного излучения, аддитивное производство, образец

STUDY OF THE INFLUENCE OF LASER RADIATION POWER WHEN PRINTING BY DIRECT LASER DEPOSITION OF METAL ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE OF 316L STEEL

Naurzalinova L.K. ✉, student, Gorunov A.I., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Romanova A.M., PhD student

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation*

E-mail: linara0101@mail.ru

Direct laser deposition of metal is an additive manufacturing method in which metal powder is melted by laser light and deposited layer by layer to create a three-dimensional metal object. This study presents a comparative analysis of the structure of 316L steel using the direct laser metal deposition method. The influence of laser radiation power on the formation of steel structure is studied.

Keywords: direct metal deposition, steel structure, laser power, additive manufacturing, sample

На сегодняшний день потребность в изготовлении деталей сложной формы, которые трудно или невозможно создать с помощью традиционных методов производства, возрастает. Одним из методов изготовления изделия является аддитивное производство, создающее объекты с высокой точностью и сложностью. Этот метод основан на накоплении материала в последовательных слоях для создания образца.

Сталь 316L – это высококачественный материал, который широко используется в машиностроении благодаря своей прочности, коррозионной стойкости и хорошим механическим характеристикам. В сочетании с аддитивными технологиями сталь 316L открывает новые возможности для создания изделий разных по сложности форм. Благодаря своим характеристикам сталь 316L является идеальным выбором для использования в агрессивных средах, таких как морская вода или химические реагенты. Ее высокая прочность и устойчивость к высоким температурам делают ее незаменимым материалом в области машиностроения, авиации и медицины.

Исследования показывают, что сталь 316L обладает уникальными механическими свойствами, такими как высокая усталостная прочность и устойчивость к коррозии при повышенных температурах. Этот материал продолжает привлекать внимание ученых и инженеров для применения в различных областях техники и технологий [1, 2].

Использование стали 316L в аддитивном производстве открывает широкие возможности для создания инновационных и сложных компонентов в различных отраслях

промышленности. Эта сталь идеально подходит для производства высококачественных деталей, которые могут быть использованы в экстремальных условиях работы. Применение стали 316L в авиационной, автомобильной и военной отраслях имеет значительные преимущества, так как легкие и прочные компоненты, изготовленные из этого материала, способствуют повышению производительности и экономической эффективности транспортных средств. Кроме того, использование стали 316L в данных отраслях позволяет снизить общий вес транспортного средства. Это может привести к уменьшению расхода топлива и выбросов вредных веществ, что является важным фактором в современном мире, ориентированном на экологическую устойчивость [3].

Цель работы – исследование влияния мощности лазерного излучения на формирование структуры стали 316L.

В качестве исходного материала использовался порошок для наплавки AISI 316L с размером частиц 63–112 мкм. В таблице приведен химический состав данного порошка. В качестве подложки использовали сталь AISI 304.

Химический состав порошка 316L, %

Fe	C	Cr	Si	Ni	Mo	Mn	Mg	Прочее
остальное	0,02	17	0,5	10,6	2,5	1,0	0,4	менее 0,1

Образцы наплавлялись на установке DMT Metal 3D Printer MX-mini, которая разработана компанией InssTek. В 3D-принтер встроен иттербиевый волоконный лазер мощностью 300 Вт, но оборудование позволяет использовать мощность свыше 400 Вт. В качестве транспортного и защитного газа для металлического порошка выступал газ аргон, скорость подачи составила 4 г/мин.

На первом этапе работы производилось просеивание порошка на установке HAVER EML 200 digital plus с амплитудой 0,6 в течение 10 мин. Сушка порошкового материала осуществлялась в печи SNOL 60/300 при температуре 60 °С в течение часа.

Второй этап подразумевал печать образцов с размерами 4×4×12 мм с мощностью от 60 до 300 Вт с шагом 30 Вт. Получено девять образцов, которые представлены на рис. 1. Уже при визуальном осмотре образцов заметна зависимость мощности лазерного излучения от высоты наплавочных образцов. Оксидная пленка на образцах, напечатанных при мощностях от 210 Вт, возникла в результате перегрева подложки и ее малых размеров. При использовании подложки больших размеров и печати крупных изделий такой проблемы не наблюдается из-за равномерного распределения температур, в результате чего наплавочный валик успевает остыть.

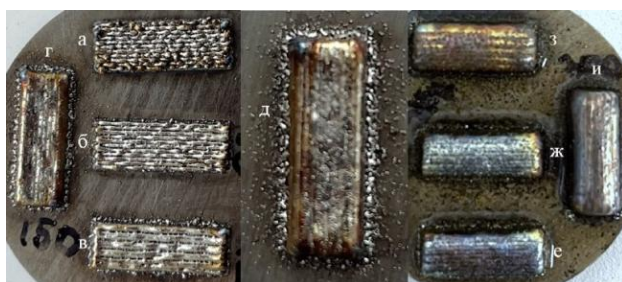


Рис. 1. Образцы, наплавленные технологией прямого лазерного нанесения металлом:

а – 60 Вт; *б* – 90 Вт; *в* – 120 Вт; *г* – 150 Вт; *д* – 180 Вт;

е – 210 Вт; *ж* – 240 Вт; *з* – 270 Вт; *и* – 300 Вт

Затем получившиеся образцы нарезаны с помощью электроэрозионной резки для дальнейших исследований. Полученные в результате компоненты запечатаны в микрошлифы и произведена обработка поверхности шлифованием и полированием (рис. 2). Шлифовка производилась на дисках зернистостью 180, 360, 600, 1200 Р. После обработки образцов

шлифованием проводилась полировка. Использовались две полироли зернистостью 15 и 6 мкм до появления зеркального блеска.



Рис. 2. Образцы, готовые к исследованиям:

a – 60 Вт; *б* – 90 Вт; *в* – 120 Вт; *г* – 150 Вт;
д – 180 Вт; *е* – 210 Вт; *ж* – 240 Вт; *з* – 270 Вт; *и* – 300 Вт

Третьим этапом стали испытания на микротвердость, а также проведено микроскопическое исследование структуры наплавленных образцов. С помощью оптической микроскопии определены средние показатели длины, ширины и высоты наплавленных образцов.

В результате исследования выявилась зависимость мощности лазерного излучения от высоты наплавленных образцов. Наблюдалось градиентное изменение микроструктуры исследуемых шлифов и градиентное изменение показателей твердости. Самые низкие показатели твердости наблюдались в верхних слоях наплавленных образцов, в средних слоях стабильные показатели твердости, в зоне термического влияния – самые высокие показатели твердости исследуемых образцов. На рис. 1, *a–б* представлены образцы, имеющие четко выраженные границы наплавленных валиков. Такой результат можно рассматривать как перспективу печати решетчатых структур стальным материалом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта No 23-29-00219.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Golyshev A.A., Malikov A.G. Scaling laws for the additive manufacturing of the AISI 316L deposited by laser surface cladding and direct metal deposition // *Optik*. 2023. Vol. 295. P. 171506. DOI: 10.1016/j.ijleo.2023.171506.
2. Enhanced quasi-static and dynamic tensile properties of stainless steel 316L produced by laser aided additive manufacturing in controlled argon environment / Li Zhang, Wengang Zhai, KaiZhao, Guijun Bi, Wei Zhou, Guoxing Lu, Shanqing Xu // *Materials Science and Engineering: A*. 2024. Vol. 895. P. 146255. DOI: 10.1016/j.msea.2024.146255.
3. Изучение свойств порошков стали 316L и сплава Inconel 718, применяемых в аддитивных технологиях, с помощью методов исследования поверхности / М.В. Царев, В.В. Мокрушин, И.А. Царева, О.Ю. Забродина, К.В. Коршунов, А.Е. Канунов, И.Ф. Кашафдинов, И.Л. Малков // *Молодежь в науке: 18-я науч.-техн. конференция*. 2019. С. 374–381.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНОГО ХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧАЕМОГО ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ МАРКИ ЭП648

Негодяев В.О.^{1,2}, начальник бюро ремонтных технологий, **Жаткин С.С.**², к.т.н., профессор, **Никитин К.В.**², д.т.н., профессор

¹ ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: vadim031198@gmail.com

Приведены результаты исследований наплавленных образцов из сплава марки ЭП648 на подложке из сплава марки ЭП718. Проанализированы особенности формирования структуры и механических свойств образцов за счет изменения параметров прямой лазерной наплавки. Подобраны оптимальные технологические режимы прямой лазерной наплавки на роботизированной установке прямого лазерного выращивания.

Ключевые слова: прямая лазерная наплавка, металлопорошковая композиция, порошок, микроанализ, структура

FEATURES OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE OF A HEAT-RESISTANT CHROMIUM-NICKEL ALLOY OBTAINED BY LASER DEPOSITION FROM A METAL-POWDER COMPOSITION OF THE EP648 BRAND

Negodyaev V.O.^{1,2}, Head of the Bureau of Repair Technologies, **Zhatkin S.S.**², PhD in Engineering Sciences, Professor, **Nikitin K.V.**², Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

¹ PJSC "UEC-Kuznetsov", Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: vadim031198@gmail.com

The results of studies of deposited samples made of EP648 alloy on a substrate made of EP718 alloy are presented. The features of the formation of the structure and mechanical properties of the samples due to changes in the parameters of direct laser surfacing are analyzed. Optimal technological modes of direct laser surfacing on a robotic installation of direct laser cultivation have been selected.

Keywords: direct laser deposition, metal powder composition, powder, microanalysis, structure

Прямая порошковая лазерная наплавка (ПЛН) является одной из разновидностей аддитивных производственных технологий. Пископо и др. [1] в своей работе выделяют такие преимущества данного метода, как способность производить крупногабаритные детали, возможность менять материал в процессе наплавки, что позволяет получать детали из разнородных материалов, и способность восстанавливать поврежденные детали.

Технология ПЛН по сравнению с традиционными методами обладает преимуществом при восстановлении деталей ГТД из-за меньших остаточных напряжений, более высокой повторяемости и более высокой точности [2]. Процесс прямой лазерной наплавки осуществляется за счет подачи металлопорошковой композиции (далее по тексту – МПК) струей защитного газа с помощью наплавочной головки непосредственно в ванну расплава, создаваемую сфокусированным лазерным лучом. Когда лазер удаляется, расплавленный материал затвердевает и образует выращенный валик (трек) [3].

В качестве наплавляемой МПК наиболее широкое использование в двигателестроительном производстве получили порошки из сплавов на никелевой основе. Это связано с тем, что более 50 % конструкции современных газотурбинных двигателей состоит из жаропрочных сплавов [4], так как одна из основных неизменных тенденций развития ГТД – повышение рабочей температуры и степени сжатия давления [5].

Основной проблемой при производстве и восстановлении деталей из никелевых сплавов является низкая трещиностойкость. Образование и распространение трещин в деталях из жаропрочных сплавов при наплавке является существенной проблемой, неизбежно влияющей на качество изделий. Склонность к трещинообразованию при ПЛН определяется составом и качеством сплавов, структурными факторами – размером зерна и структурной неоднородностью, составом присадочных материалов и технологией наплавки [6].

Прямая лазерная наплавка, исследование микроструктуры и механических свойств проводились на образцах-пластинах, изготовленных из сплава ЭП718 длиной 100 мм, шириной 30 мм и толщиной 4 мм. Внешний вид наплавленных образцов и разметка, по которой осуществлялась разрезка на темплеты, представлены на рис. 1. Количество слоев наплавки составило три трека.

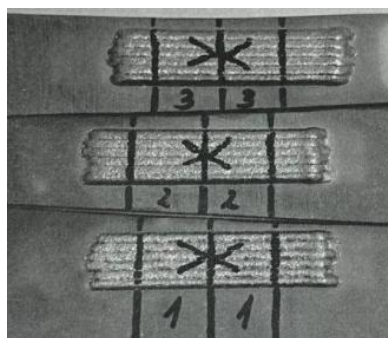


Рис. 1. Внешний вид наплавленных образцов при мощности лазерного излучения:
1 – 1000 Вт, 2 – 1200 Вт, 3 – 1400 Вт

Прямая лазерная наплавка производилась на роботизированной установке прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-XL, оснащенной камерой с контролируемой атмосферой, наплавляемый материал – МПК марки ЭП648 фракцией 40–150 мкм (табл. 1). Наплавка осуществлялась в среде защитного газа (аргон высший сорт газообразный ГОСТ 10157-2016).

Таблица 1

Химический состав МПК марки ЭП648

Сплав	Основные элементы							Примеси				
	Ni	Cr	Al	Ti	Mo	Nb	Fe	C	S	P	Mn	Si
ЭП648	основа	32,0–35,0	0,5–1,1	0,5–1,1	2,3–3,3	0,5–1,1	не более					
							4,0	0,1	0,01	0,015	0,5	0,4

Исследования микротвердости всех образцов проводились на микротвердомере DuraScan-20 фирмы EMCO-TEST Prüfmaschinen GmbH (Австрия) при нагрузке 0,05 кг.

Для исследования была произведена прямая порошковая лазерная наплавка образцов на трех режимах, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Режимы прямой лазерной наплавки

Параметр режима наплавки	Значение		
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Мощность лазерного излучения, Вт	1000	1200	1400
Скорость наплавки, мм/с	20		
Шаг слоя, мм	0,4		
Ширина трека, мм	2,5		

Параметр режима наплавки	Значение		
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Мощность лазерного излучения, Вт	1000	1200	1400
Диаметр лазерного пятна, мм	2,6		
Расход порошка, г/мин	15,6		
Расход газа			
В наплавочное сопло, л/мин	12		
На защитное стекло, л/мин	7		
Транспортирующий газ, л/мин	5		

Режимы наплавки подбирались исходя из рекомендаций производителя установки и предшествующих экспериментальных исследований [7].

При внешнем осмотре полученных образцов дефектов наплавки обнаружено не было, однако наружные поверхности имеют рельеф наплавленных валиков, что напрямую связано с послойным методом наплавки (рис. 2).

Замеры микротвердости производились согласно ГОСТ 9450-76 методом восстановленного отпечатка четырехгранной пирамидой с квадратным основанием (по Виккерсу) [8] по высоте зоны наплавки. Результаты измерений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений микротвердости по высоте зоны наплавки

№ образца	1	2	3
Мощность лазерного излучения, Вт	1000	1200	1400
Микротвердость наплавленного материала HV ₅₀	302	375	320
	325	340	363
	316	341	330
	289	369	346
	293	352	325
	302	341	350
	311	352	320
	297	330	346
	316	346	316
	325	352	336
Интервал значений HV ₅₀	293–325	330–375	320–363
Среднее значение HV ₅₀	307,6	349,8	335,2

Интервал значений микротвердости основного материала пластины (образца) из сплава ЭП718 равен HV₅₀ = 293–306. Результаты испытаний показали, что при повышении мощности лазерного излучения (ЛИ) от 1000 до 1200 Вт микротвердость наплавленных слоев возрастает, но при дальнейшем увеличении до 1400 Вт показатели незначительно уменьшаются. При этом из табл. 2 видно, что наиболее приближенной к значениям материала подложки является микротвердость наплавленного материала на образце № 1.

Макроисследование образцов показало, что на образце № 1 наблюдается большое количество несплавлений размером от 0,3×0,1 мм до 0,7×0,3 мм на границе валиков (см. рис. 2), на образце № 2 обнаружены поры диаметром от 0,8 до 0,12 мм в количестве 3 шт. внутри валика, на образце № 3 дефектов не выявлено. В исследованных сечениях всех образцов на границе сплавления валиков с основным материалом подложки и в зоне термического влияния дефекты отсутствуют.



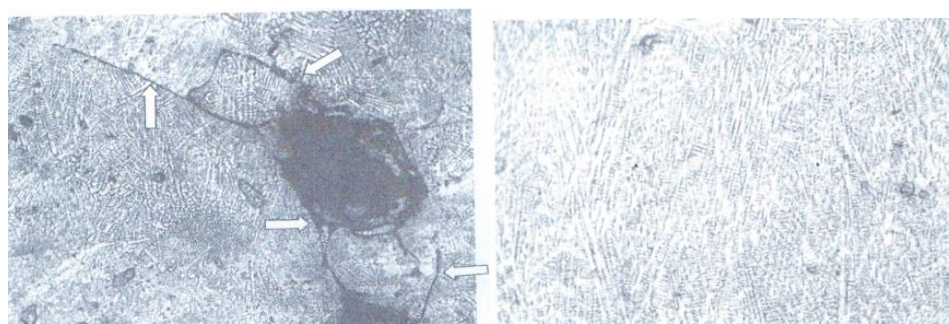
a



б

Рис. 2. Макроструктура образцов:
a – образец № 1, $\times 14$, *б* – образец № 2, $\times 14$

При анализе микроструктуры установлено, что в наплавленном материале всех образцов наблюдается слоистая столбчатая мелкодендритная структура литого сплава (рис. 3). В образце по режиму № 1 на границах валиков обнаружены множественные несплавления, на границе которых образуются микротрещины, имеющие разветвленную форму (рис. 3, *a*).



a

б

Рис. 3. Микроструктура наплавленного материала:
a – по режиму № 1, $\times 200$, *б* – по режиму № 3, $\times 200$

Дефекты, выявленные в исследуемых образцах, представлены в табл. 4. По результатам анализа микроструктуры образца № 3 дефекты в наплавленном материале отсутствуют.

Таблица 4

Дефекты в наплавленном материале образцов

№ образца	Вид дефекта	Максимальный/минимальный размер дефекта, мм	Количественная характеристика
1	Несплавления	0,7 \times 0,3	Множественные
2	Поры	0,12	Единичные
3	–	–	–

Таким образом, проведенные исследования показали, что в образце № 3 при мощности лазерного излучения 1400 Вт формируется оптимальный наплавленный слой с микротвердостью выше, чем у материала подложки, дефекты отсутствуют. Параметры данного режима наплавки обеспечивают полное расплавление МПК марки ЭП648.

По результатам исследований образцов, полученных методом прямой лазерной наплавки МПК марки ЭП648, установлено:

1. При макроисследовании образца № 1 выявлены множественные несплавления по границам валиков, что напрямую связано с недостаточной для полного оплавления МПК мощностью лазерного излучения.

2. В структуре выращенных образцов независимо от режимов прямой лазерной наплавки формируется «слоистая» структура за счет наложения валиков друг на друга. При этом в каждом слое образуется мелкодендритная структура, что обусловлено высоким теплоотводом вглубь материала.

3. Оптимальным является режим наплавки при мощности лазерного излучения 1400 Вт. При этом происходит полное плавление частиц МПК и на данном режиме дефектов в наплавленном материале не обнаружено, а микротвердость наплавленной зоны выше показателей материала подложки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Analysis of single tracks of IN718 produced by laser powder directed energy deposition process / G. Piscopo, E. Atzeni, S. Biamino, L. Iuliano, F. Mazzucato, A. Saboori, A. Salm, A. Valente // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 112. Pp. 340–345. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair / A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi, P. Fino // *Applied Sciences*. 2019. 9.
3. Piscopo G.; Atzeni E.; Salmi A. A Hybrid Modeling of the Physics-Driven Evolution of Material Addition and Track Generation in Laser Powder Directed Energy Deposition // *Materials*. 2019. 12. 2819.
4. Баранов Д.А. Структура и свойства жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ХН68ВМТЮК при лазерной сварке деталей ГТД: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.17. 2021. 150 с.
5. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) // *Материаловедение*. 2010. № 7. С. 24–28.
6. Снижение дефектности жаропрочных никелевых сплавов в технологиях наплавки / Е.А. Кривоносова, Ю.Д. Щицын, С.Н. Акулова, А.В. Мышкина, С.Д. Неулыбин, Д.С. Белинин // *Вестник Пермск. нац. иссл. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20. № 2. С. 12–19.
7. Негодяев В.О. Статистический анализ дефектообразования в наплавленном материале в зависимости от технологических параметров // *Наука и образование: теория и практика: матер. Междунар. науч.-практ. конференции, Нефтекамск, 13 декабря 2022 года. Нефтекамск: Науч.-изд. центр «Мир науки», 2022. С. 28–34.*
8. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников Введ. 1977-01-01. М.: Издательство стандартов, 1993.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ ИЗ СИСТЕМЫ Ti-C-Cu В РЕЖИМЕ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Некрасов В.И., студент, **Латухин Е.И.**, к.т.н., доцент, **Кондратьева Л.А.**, д.т.н., профессор

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: parodyofme@yandex.ru, evgelat@yandex.ru, schiglou@yandex.ru*

Представлены экспериментальные исследования по получению керамики из смеси Ti + C с 30 % добавкой меди. Установлено, что конечный продукт представлял собой пористый каркас, микроструктура которого (в разломе) включает мелкие и крупные многогранные частицы TiC, а также мелкие округлые частицы TiC. Мелкие многогранные частицы TiC соединены по границам зерен Cu.

Ключевые слова: СВС, карбид кремния, медь, керамика, микроструктура

PRODUCTION OF POROUS CERAMICS FROM THE Ti-C-Cu SYSTEM IN THE MODE OF SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

Nekrasov V.I., student, **Latukhin E.I.**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Kondratyeva L.A.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: parodyofme@yandex.ru, evgelat@yandex.ru, schiglou@yandex.ru*

Experimental studies on the production of ceramics from a Ti + C mixture with a 30 % addition of copper are presented. It was established that the final product was a porous frame, the microstructure of which (in the fracture) is represented by small and large polyhedral TiC particles, as well as small rounded TiC particles. Small polyhedral TiC particles are connected along the boundaries of Cu grains.

Keywords: SHS, silicon carbide, copper, ceramics, microstructure

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) относится к процессу, при котором материалы с достаточно высокой теплотой образования синтезируются в волне горения, самопроизвольно распространяющейся после воспламенения по реагентам и превращающей их в продукты. Заметными преимуществами этого метода являются его низкая стоимость, высокая энергоэффективность, простота в эксплуатации и высокая чистота продуктов реакции. Более того, характеристики чрезвычайно быстрого нагрева и высокой температуры потенциально позволяют получать материалы с новыми структурами и свойствами [1, 2].

Керамика из карбида титана (TiC) обладает желаемыми свойствами, такими как низкая плотность, высокая температура плавления, хорошая термическая и химическая стабильность, высокая твердость и превосходная износостойкость. TiC-керамика может быть получена из смесей титановых и углеродных порошков методом СВС. Однако температура воспламенения бинарной системы Ti-C очень высока и даже близка к температуре плавления титана. Поэтому вторые металлы с низкой температурой плавления вводятся в исходную шихту для снижения температуры воспламенения путем образования легкоплавких интерметаллидов и перехода в жидкость при низкой температуре для улучшения превращения массы. Вязкость разрушения композита с матрицей TiC может быть улучшена добавлением в качестве непрерывной фазы пластичного металла, например Cu [2].

Система Cu-Ti-C привлекает к себе все большее внимания из-за возможности ее применения в качестве электрических скользящих контактов, электродов контактной сварки, высокопроизводительных переключателей, двигателей, теплообменников и электродов. Поэтому в качестве металла – добавки в смесь титана с углеродом была выбрана медь, которая

сможет не только способствовать легкому протеканию СВС-реакции, но и улучшить конструкционное применение. Взаимодействие углерода и расплавов Cu-Ti исследовали в работах [3–6]. Известно, что рост зерен TiC происходит одновременно с увеличением содержания углерода в частицах TiC при охлаждении [7]. В работе [8] установлено, что использование крупных порошков титана и углерода позволяет получать пористые заготовки из карбида титана без трещин и большей прочности. Но при этом затруднено инициирование реакции, которое можно преодолеть с помощью предварительного подогрева исходной смеси порошков.

Исходные порошки титана (марки ТПП-7) и углерода (графит марки С-2) взвешивались и смешивались между собой в стехиометрическом соотношении. Затем в полученную смесь добавлялось по массе 30 % порошка меди (марка ПМ1) и все перемешивалось до получения однородной массы. Полученная смесь (Ti+C) + 30 % Cu засыпалась в пресс-форму для прессования.

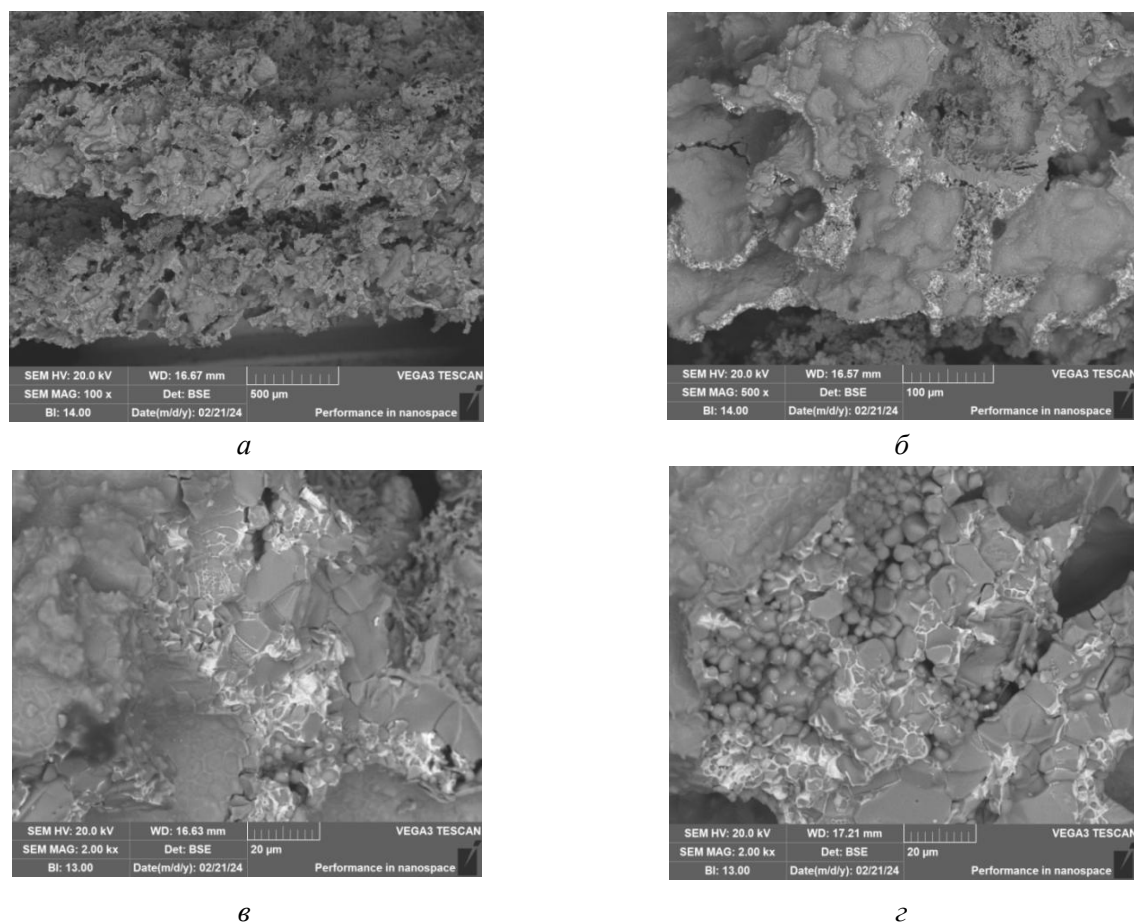


Рис. 1. Микроструктура синтезированного продукта TiC-Cu при разном увеличении:

a – $\times 100$; *б* – $\times 500$; *в* и *г* – $\times 2000$

Проводилось одностороннее прессование шихты при давлении 20 МПа и для получения цилиндрического образца диаметром 23 мм. Масса каждой заготовки составляла 10 г. Полученный цилиндрический образец нагревался в печи до 300 °С, а затем устанавливался на слой речного песка. Реакцию горения инициировали электрической спиралью накаливания. Синтез и охлаждение полученных образцов проводили на воздухе. Для изучения использовали сколы из центральной части образца. Микроструктура исследовалась на растровом электронном микроскопе TescanVega3 с приставкой локального микрорентгеноспектрального анализа X-act.

На рис. 1 представлена микроструктура продукта, полученного в режиме горения из смеси (Ti+C) + 30 % Cu, нагретой перед синтезом в печи до 300 °С. Видно, что после синтеза образец представлял собой высокопористый продукт (рис. 1, *a*), с большим количеством

закрытых пор, о чем можно судить по микроструктуре, представленной на рис. 1, б. Видно большое количество пор, разделенных между собой тонкими стенками. Микроструктура стенок пор (рис. 1, в и г) состоит из частиц разной химической природы, разного размера и структуры, располагающихся в определенных участках разломов. Более мелкие частицы размером до 4 мкм, как округлой формы, так и многогранной, расположены ближе к поверхности или на поверхности стенки (рис. 2), то есть ближе к поре. А крупные многогранные частицы размером до 30 мкм, по границам которых как раз и прошел разлом, находятся в центральной части стенки (см. рис. 2).

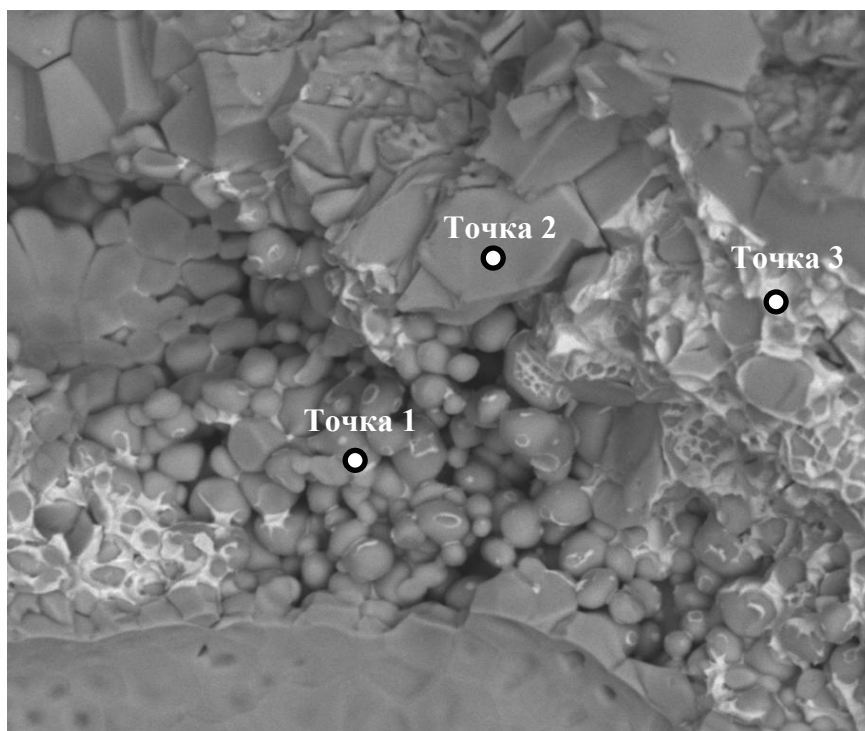


Рис. 2. Микроструктура синтезированного продукта с обозначением точек (спектр 1, 2 и 3), в которых проводилось определение элементного химического состава

Чтобы определить фазовый состав конечного продукта, был проведен элементный химический анализ в нескольких точках, соответствующих разным структурным элементам (см. рис. 2). Из таблицы видно, что в точках 1 и 2 микроструктура конечного продукта состоит из Ti и C, что говорит об идентификации мелких частиц округлой формы, а также мелких и крупных частиц многогранной формы как частиц карбида кремния TiC. Светло-серые прожилки между мелкими многогранными частицами TiC (рис. 2), как показали исследования элементного анализа конечного продукта, были идентифицированы как пленки, состоящие из меди, с небольшими добавками C и Ti (см. таблицу). Полученные фотографии микроструктуры (см. рис. 1 и 2) только подтверждают известный факт, что присутствие титана в жидком металле усиливает смачивание TiC медью [3]. Стоит обратить внимание на то, что в пространстве между крупными частицами TiC медь отсутствует.

Элементный химический состав в точках образца, синтезированного из смеси (Ti+C) + 30 % Cu в процессе СВС

Элемент	Атом. %		
	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Ti	45,45	46,96	6,32
C	54,06	53,04	13,16
Cu	0,49	–	80,52

Такая неоднородная структура конечного продукта указывает на разные механизмы образования карбида титана, что соответствует данным других исследователей системы Cu-Ti-C. Непосредственное взаимодействие углерода с расплавленными частицами титана приводит к образованию мелких округлых зерен TiC. Другой механизм образования TiC включает диффузию титана из расплава Ti-Cu к частицам углерода или карбида титана с образованием крупных многогранных частиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. 336 с.
2. Study on the reaction behavior of self-propagating high-temperature synthesis of TiC ceramic in the Cu-Ti-C system / Yunhong Liang, Zhiwu Han, Zhaohua Lin, Luquan Ren // *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Vol. 35 (2012). Pp. 221–227.
3. Reactive wetting in titanium carbide/non-reactive metal systems / N. Frage, N. Froumin, M. Aizenshtein, L. Kutsenko, D. Fuks, M.P. Dariel // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. Vol. 9 (2005). Pp. 189–195.
4. Cast in situ Cu–TiC composites: Synthesis by SHS route and characterization / S. Rathod, O.P. Modi, B.K. Prasad, A. Chrysanthou, D. Vallauri, V.P. Deshmukh, A.K. Shah // *Materials Science and Engineering*. Vol. 502 (2009). Pp. 91–98.
5. Effects of boron addition on the microstructure and properties of in situ synthesis TiC reinforced Cu-Ti-C composites / Haimin Ding, Qing Liu, Xianlong Wang, Xiaoliang Fan, Matthew Krzystyniak, Nicolas Glandut, Chong Li // *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 766 (2018). Pp. 66–73.
6. Evolution process of the synthesis of TiC in the Cu-Ti-C system / Y.H. Liang, H.Y. Wang, Y.F. Yang, Y.Y. Wang, Q.C. Jiang // *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 452 (2008). Pp. 298–303.
7. Crystal growth of TiC grains during SHS reactions / B. Cochepein, V. Gauthier, D. Vrel, S. Dubois // *Journal of Crystal Growth*. Vol. 304 (2007). Pp. 481–486.
8. Латухин Е.И., Умеров Э.Р., Луц А.Р. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез заготовок пористого карбида титана для последующей инфильтрации расплавами // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2021. Т. 19. № 7. С. 332–330. DOI: 10.36652/1684-1107-2021-19-7-322-330.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО НАПЫЛЕНИЯ С ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ЛАЗЕРОМ

Орлова М.С., аспирант, **Горунов А.И.**, профессор, д.т.н., доцент

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация
E-mail: oms1999@yandex.ru*

Представлены результаты влияния термической обработки на структуру и электропроводность медных покрытий, полученных методом холодного газодинамического напыления с интенсификацией лазером. С увеличением температуры происходит объединение отдельных частиц порошка в единый объем, формируется плотное металлическое покрытие, при этом увеличивается удельная электропроводность.

Ключевые слова: холодное напыление, термическая обработка, лазерное излучение

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF COPPER COATINGS OBTAINED BY COLD SPRAYING WITH LASER INTENSIFICATION

Orlova M.S., PhD student, **Gorunov A.I.**, Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation
E-mail: oms1999@yandex.ru*

The results of the effect of heat treatment on the structure and electrical conductivity of copper coatings obtained by cold spraying with laser intensification are presented. With an increase in temperature, individual powder particles are combined into a single volume, a dense metal coating is formed, while the specific electrical conductivity increases.

Keywords: cold spraying, heat treatment, laser emission

В настоящее время медные покрытия находят широкое применение в машиностроении и электронике. Покрытия из меди используются как подслои для нанесения на деталь внешнего слоя многослойного покрытия. Объясняется такое применение меди тем, что она способна заполнять углубления и сглаживать нежелательный рельеф поверхности, что делает возможным нанесение основного металла ровным и однородным слоем. Покрытия на основе меди также обладают антифрикционными свойствами, что позволяет использовать такие покрытия для уменьшения потерь на трение и увеличения срока службы трущихся поверхностей машин и механизмов. Благодаря своей высокой электропроводности и податливости при пайке медь находит применение и в электронике и электротехнике, тонкие покрытия на основе меди используются для изготовления плат.

Существуют различные способы нанесения медных покрытий. Однако лазерное нанесение покрытий, дающее высокую точность, в случае с медью затруднено ввиду высокого коэффициента отражения (для длин волн, близких к 1 мкм, он достигает порядка 90 %). Альтернативным решением в данном случае является использование метода холодного напыления с интенсификацией лазером.

В процессе холодного газодинамического напыления частицы порошка ускоряются сверхзвуковой струей сжатого газа в сопле Лаваля и ударяются о подложку. Соединение частиц порошка при этом происходит с помощью кинетической энергии частиц, а не ввиду их плавления, так как степень нагрева частиц при данном процессе ниже температуры плавления материала. В отличие от стандартной технологии в методе холодного напыления

с интенсификацией лазером в дополнение к сверхзвуковому соплу вводится лазерное излучение, которое воздействует на материал подложки и снижает критическую скорость осаждения напыляемых частиц порошка. Дополнительное применение лазерного излучения способствует увеличению пластической деформации частиц порошка при их столкновении с подложкой и обеспечивает хорошую адгезию с подложкой [1].

В ходе проведения эксперимента было получено многослойное покрытие из медного порошка, нанесенное методом холодного напыления с интенсификацией лазером. Покрытие наносилось на стальную трубу диаметром 76 мм. Сверхзвуковое сопло Лавала и лазерная головка во время процесса были неподвижны, подложка при этом вращалась с небольшим смещением под управлением робота-манипулятора. Траектория нанесения покрытия образовывала форму спирали. Для нанесения многослойного покрытия использовались сферические частицы стабилизированного медного порошка ПМС-1.

Для исследования влияния термической обработки на характеристики и свойства полученных медных покрытий были выбраны следующие режимы: отжиг при температуре 300 °С и 400 °С в течение часа с остыванием в печи, плавление при температуре 1000 °С в течение часа. Данные режимы термической обработки были подобраны исходя из опыта имеющихся зарубежных исследований [2, 3].

После проведения термической обработки каждый образец, в том числе и исходный, был разрезан на две части. Одна из частей была запрессована в компаунд, после чего из полученной в ходе запрессовки шайбы был подготовлен шлиф для исследования структурных изменений покрытия. Вторая часть представляла собой тонкую полоску покрытия толщиной порядка 2–2,5 мм, вырезанная часть использовалась для определения удельной электропроводности покрытия. Внешний вид образца для измерения удельной электропроводности представлен на рис. 1.

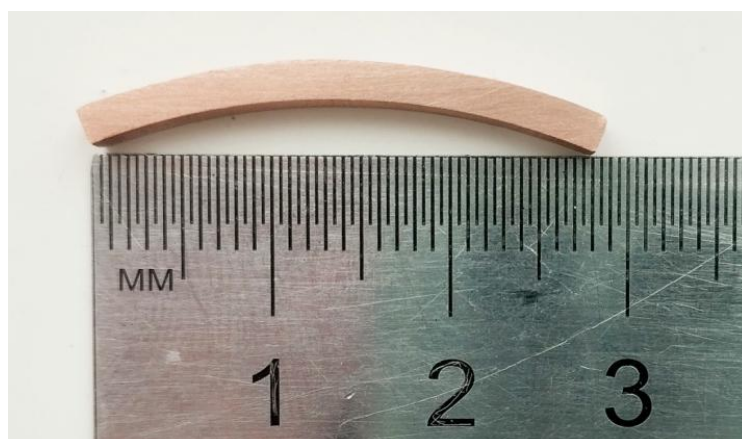


Рис. 1. Образец из медного покрытия для измерения удельной электропроводности

Отполированные шлифы были исследованы на инвертированном микроскопе Axio Observer.A1m. Снимки образцов, полученные с помощью микроскопа, представлены на рис. 2. В исходном образце частицы порошка не связаны друг с другом, видна четкая граница разделения между частицами (рис. 2, а). Форма частиц порошка из сферичной стала линзообразной [4], что связано с ее сильной пластической деформацией после удара о подложку. В структуре образцов, подвергшихся отжигу, наблюдается уменьшение границ между частицами; это привело к тому, что границы стали менее четкими (рис. 2, б, в). Наблюдается тенденция слияния частиц в связи с ускорившимися диффузионными процессами. Данная тенденция соблюдается и для образца, подвергнутого нагреванию при 1000 °С. Между частицами порошка практически полностью исчезли границы (рис. 2, г). На их месте возникают закрытые поры, повторяющие контур границ между частицами порошка, образование этих пор также объясняется диффузионными процессами. Газовые поры, присутствующие в исходном порошке меди, при интенсивном нагреве начинают диффундировать к границе частиц.

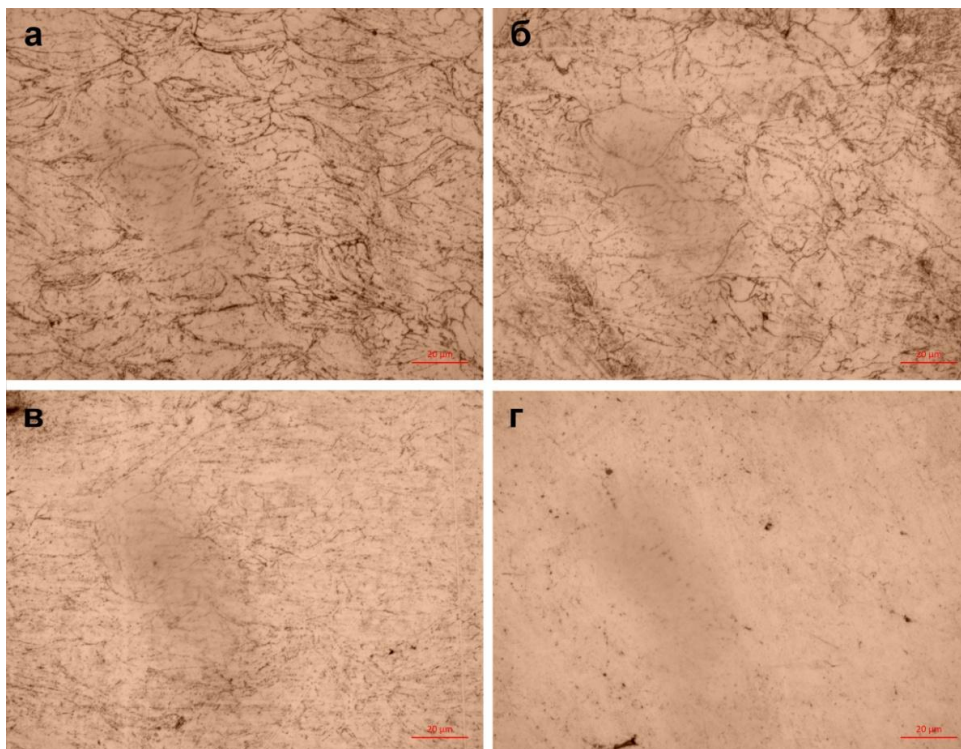


Рис. 2. Снимки структуры медных покрытий:
а – исходного, *б* – отожженного при 300 °С,
в – отожженного при 400 °С, *г* – сплавленного при 1000 °С

Измерение сопротивления медных образцов с целью определения их удельной электропроводности проводилось на потенциостате посредством снятия вольтамперной характеристики образцов. Для расчета удельной электропроводности медных образцов использовалась следующая формула:

$$\sigma = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{S},$$

где R – измеренное сопротивление образца,
 l – длина,
 S – площадь поперечного сечения образца.

Для четырех образцов были получены значения удельной электропроводности, которые представлены в таблице.

Значения сопротивления и удельной электропроводности медных образцов

Образец	Удельное сопротивление, мкОм·м	Удельная электропроводность, МСм·м ⁻¹
Исходный	0,018	55,6
Отжиг при 300 °С	0,0181	55,18
Отжиг при 400 °С	0,0181	55,37
Плавление при 1000 °С	0,0179	55,93

Удельная электропроводность меди, изготовленной традиционными методами (литьем, прокаткой) при 20 °С составляет около 55,5–58 МСм·м⁻¹ [5]. Таким образом, можно сделать вывод, что полученные данные, находящиеся в диапазоне от 55,2 до 55,9 МСм·м⁻¹, являются достоверными.

Наибольшая удельная электропроводность наблюдается у образца, подвергшегося нагреванию при 1000 °С, и у исходного образца (рис. 3). Увеличение электропроводности

при термической обработке температурами, близкими к температуре плавления меди, может быть объяснено исчезновением границ между частицами порошка, покрытие стало более однородным.

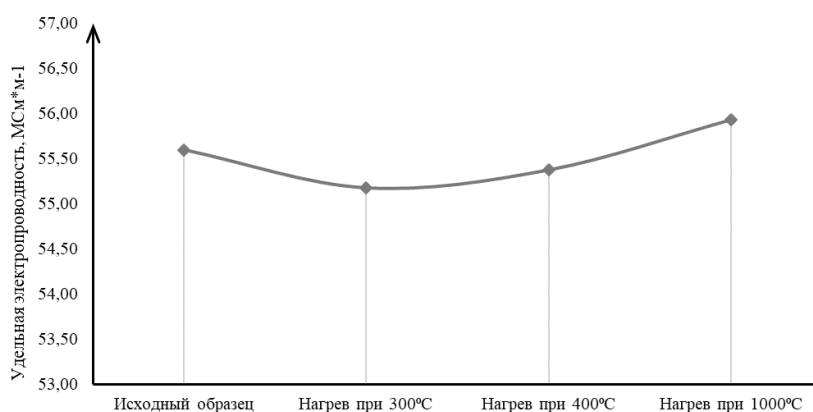


Рис. 3. Графическая зависимость удельной электропроводности медных покрытий от термической обработки

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что при термическом воздействии на медные покрытия, выполненные методом холодного газодинамического напыления с интенсификацией лазером, вместе с ростом температуры происходит постепенное диффузионное слияние частиц порошка. В конечном итоге данные процессы приводят к образованию однородного покрытия, обладающего высокой удельной электропроводностью. При этом удельная электропроводность данных покрытий лишь незначительно уступает удельной электропроводности меди, изготовленной традиционными методами получения металлических заготовок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gorunov A.I. Investigation microstructure and fracture behavior of welded stainless steel specimens previously obtained by supersonic laser deposition // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 56. Pp. 746–756. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.05.040.
2. The effects of heat treatment on the mechanical properties of cold-sprayed coatings / R. Huang, M. Sone, W. Ma, H. Fukanuma // Surface and Coatings Technology. 2015. Vol. 261. Pp. 278–288. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.01.
3. Effect of build orientation and post-build heat treatment on the mechanical properties of cold spray additively manufactured copper parts / N. Hutasoit, R.A.R. Rashid, S. Palasinamy, A. Duguid // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 110. P. 2359. DOI: 10.1007/s00170-020-06010-5.
4. Microstructure and mechanical anisotropy of additively manufactured cold spray copper deposits / S. Yin, R. Jenkins, X. Yan, R. Lupoi // Materials Science and Engineering: A. 2018. Vol. 734. Pp. 67–76. DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.096.
5. Алиев И.И. Электротехнический справочник. Т. 1. М.: ИП РадиоСофт, 2006. 480 с. ISBN 5-93037-157-1.

РАЗВИТИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ МІМ-ТЕХНОЛОГИИ

Пархоменко А.В. ✉, аспирант, **Амосов А.П.**, д.ф.-м.н., профессор,
Самборук А.Р., д.т.н., профессор

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

По зарубежным научным публикациям последних лет анализируются перспективные направления развития применения металлических порошков для производства деталей по технологии инжекционного формования металлических порошков с расплавами полимеров (Metal Injection Molding) или, сокращенно, по МІМ-технологии. Показано, что в настоящее время в научно-исследовательских работах все более широко используются порошки титана, также часто применяются порошки нержавеющей и инструментальных сталей, магнитных и твердых сплавов. Отмечены тенденции применения экономичных порошков неправильной формы взамен дорогостоящих сферических порошков, а также модификации исходных порошков добавлением в них различных компонентов для улучшения свойств промежуточного МІМ-сырья (гранулятов) и придания МІМ-изделиям необходимых специфических свойств.

Ключевые слова: МІМ-технология, инжекционное формование, гранулят, порошки металлов, стали, сплавы, титан

DEVELOPMENT OF THE USE OF METAL POWDERS FOR MIM TECHNOLOGY

Parkhomenko A.V. ✉, PhD student, **Amosov A.P.**, Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor, **Samboruk A.R.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

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

The article on foreign scientific publications of recent years analyzes promising directions for the development of the use of metal powders for manufacturing components from the mixtures of metal powders with polymer melts using injection molding technology (Metal Injection Molding) or, in short, MIM technology. It is shown that titanium powders are currently being increasingly used in scientific research, and powders of stainless and tool steels, magnetic and hard alloys are also often used. Trends in the use of economical irregularly shaped powders instead of expensive spherical powders, as well as modifications of the initial powders by adding various components to them to improve the properties of intermediate MIM raw materials (feedstocks) and give the necessary specific properties to the MIM products, are noted.

Keywords: MIM technology, injection molding, feedstock, metal powders, steels, alloys, titanium

Metal Injection Molding или МІМ-technology – это технология инжекционного формования металлических порошков с расплавами полимеров, которая представляет собой совокупность методов порошковой металлургии и литья полимерных материалов под давлением. В изделиях, изготовленных при помощи МІМ-технологии, сочетаются точность и сложность геометрической формы, как у полимерных изделий, с прочностными характеристиками металла. МІМ-технология предназначена для серийного производства малогабаритных деталей сложной формы взамен производства путем обработки резанием. Экономический эффект при использовании МІМ-технологии достигается за счет изготовления большого числа изделий с использованием одной пресс-оснастки. Данный вид производства готовых изделий достаточно давно и успешно развивается за рубежом, но пока мало применяется в России [1, 2].

Промежуточным сырьем для технологии инжекционного формования служит фидсток (feedstock), или гранулят, который представляет собой специально изготовленные гранулы смеси мелкодисперсных металлических порошков с полимерным связующим. Очевидно, что

свойства металлических порошков как одного из основных компонентов гранулята имеют очень большое значение, так как в значительной степени определяют свойства конечного продукта МИМ-процесса. Перечень металлов, которые могут быть использованы в МИМ-технологии, очень широк – от низколегированных сталей до жаропрочных, коррозионно-стойких, высокопрочных сталей и сплавов, в том числе на основе меди, никеля, кобальта, титановых, интерметаллических, магнитных, прецизионных сплавов, а также нитридов, карбидов, боридов. В настоящей работе представлены результаты проведенного анализа научной литературы последних лет, которые показывают следующие тенденции в применении металлических порошков в МИМ-технологии.

1. Карбонильное железо, железные порошки. Порошки карбонильного железа благодаря своим уникальным свойствам были и остаются являются ключевым сырьем в качестве основы смеси металлических порошков для гранулятов МИМ-технологии. Наиболее распространено применение порошков карбонильного железа правильной сферической формы для обеспечения более легкой текучести материала. В работе [3] показано, что использование таких порошков с частицами разного размера от 600 нм до 5,5 мкм в диаметре увеличивают коэффициент упаковки металлического порошка в грануляте, так как частицы малого размера заполняют пустоты между более крупными частицами. Применение порошка на основе железа неправильной формы, полученного методом водного распыления со средним размером частиц 10 мкм показало, что более экономичные порошки железа неправильной формы представляют собой многообещающую альтернативу изготовлению металлических деталей методом МИМ по сравнению с их относительно дорогими аналогами (порошком карбонильного железа правильной формы) [4].

2. Порошки нержавеющей стали. Часто в последних зарубежных работах встречается применение сферических порошков нержавеющей стали марки 17-4PH и аустенитной 316L или их смеси. В данных работах исследуется влияние на механические свойства гранулятов и спеченных МИМ-изделий применение порошков нержавеющей стали, полученных разными способами: распылением водой и распыление газом. Для приготовления МИМ-гранулятов в большинстве случаев выбираются порошки нержавеющей стали с размерами частиц от 5 до 45 мкм [5]. В современных исследованиях применение порошков нержавеющей стали для МИМ-технологии рассматривается в рамках модификации исходной смеси добавлением в нее различных компонентов для улучшения реологических свойств исходного сырья (фидстоков) и свойств конечных изделий, придания изделиям необходимых специфических свойств, а также усовершенствования МИМ-процесса. Так в исследовании [6] использовались сферические порошки нержавеющей стали 17-4PH с обработкой их поверхности силановыми агентами для улучшения совместимости и прочности межфазного соединения между порошком и связующим. Было доказано, что текучесть, критическая загрузка твердых частиц, плотность, модуль упругости при изгибе и сохранение формы сырья, полученного с помощью обработанных порошков, были лучше, чем у исходных. Эксплуатационные характеристики нержавеющей стали очень чувствительны к содержанию углерода и кислорода, поэтому колебания вредных примесей должны точно контролироваться в МИМ-процессе. В работе [7] установлено, что при легировании порошка нержавеющей стали 316 L небольшим количеством графита (0, 500, 1000, 1500 и 2000 ppm) содержание кислорода в нем можно эффективно снизить за счет углерод-кислородной реакции в процессе спекания. При изучении иностранных публикаций также была обнаружена тенденция использования в качестве компонентов исходной смеси для МИМ-процесса бимодального порошка нержавеющей стали, который имеет более высокую сыпучесть, смеси из данных порошков демонстрируют превосходную формуемость, а получаемые продукты имеют более высокую плотность [8]. Интересной представляется работа [9], посвященная получению пористых металлических фильтров по МИМ-технологии из гранулята из стали 316L со специальным антимикробным покрытием из Zn, Cu, Ag, нанесенным методом гальванического электроосаждения (0,10 А), которое полностью предотвратило рост бактерий золотистого стафилококка.

3. Быстрорежущие (инструментальные) стали. Применение быстрорежущих сталей для изготовления инструментов по МИМ-технологии в поздних работах представляет интерес

с точки зрения применения армирующих добавок. Так, в работе [10] исследовано влияние добавления к газораспыленному сферическому порошку быстрорежущей стали (AISI M2) с размером 23 мкм порошка карбида ванадия VC неправильной формы с размером 14 мкм. Сырье, армированное 6 и 10 вес. % VC, показало наилучшие реологические характеристики, полученные детали имеют постоянный вес и размеры, хорошую формуемость, плотность, сохранение формы и жесткость. Также доказано, что микротвердость и износостойкость изделий улучшаются при добавлении VC.

4. Твердые сплавы. В качестве исходного сырья для МИМ-процесса наиболее часто в иностранных работах встречается применение карбида вольфрама WC. В работе [11] изучалось положительное влияние добавки твердосмазочного материала из MoS₂ на трение скольжения и износ как на плоские, так и на текстурированные образцы, изготовленные по МИМ-технологии из порошка твердого сплава WC-Co со средней плотностью 14 г/см³ и твердостью по Виккерсу более 1440 HV10.

5. Магнитные сплавы. В работе [12] исследовано влияние параметров спекания и особенностей микроструктуры на магнитные свойства сплава Fe-3 масс. % Si. Было обнаружено, что большой размер зерна около 300 мкм и большие углы границ зерен, находящиеся в диапазоне 30–60°, благоприятно влияют на магнитные свойства полученных образцов. Также является интересной работа [13], в которой МИМ-методом изготавливали гибридные магнитомягкие композиты с использованием бимодальных порошков аморфного Fe₇₃Si₁₁B₁₁C₃Cr₂, полученного комбинированным методом водогазового распыления (18 мкм) и кристаллического, распыленного газом, порошка Fe₅₀Co₅₀ (6,6 мкм.). В результате исследования выявлено, что гибридные магнитомягкие композиты с 50 % долей порошка Fe₅₀Co₅₀ проявляют наилучшие комплексные магнитные свойства.

6. Порошки титана. В последние годы порошки титана и его сплавы получили широкое распространение в МИМ-технологии. Это связано с тем, что титан легкий конструкционный материал, обладающий биосовместимостью, высокой прочностью и устойчивостью к коррозии. Однако изделия из него остаются сложными и дорогими в производстве. В настоящее время зарубежные разработки работоспособного МИМ-процесса титановых сплавов направлены на поиск и исследование оптимальных порошковых композиций, удовлетворяющих требованиям МИМ-технологии, контроль за содержанием в титановых сплавах кислорода и углерода в процессе производства, повышение защиты титана во время обработки при повышенных температурах и применение оптимальных связующих для такого активного материала. В работах последних лет часто встречается применение в качестве исходного сырья для изготовления гранулятов порошков чистого титана с минимальным содержанием вредных примесей (O, C, N) и высокочистого порошка титанового сплава (GA Ti-6Al-4V), Ti-48Al-2Cr-2Nb порошка сплава Ti-6Al-7Nb или легированного порошка Ti-27,5Nb-8,5Ta-3,5Mo-2,5Zr-5Sn, мелкие сферические частицы (7–45 мкм) которых обеспечивают высокую загрузку порошка в исходной смеси. Однако производство порошка со сферическими частицами определенного размера является дорогостоящим. Большое внимание уделяется применению в качестве исходного сырья для МИМ-процесса недорогого и легкодоступного порошка гидрида титана (TiH₂) или гидрид-дегидрида титана (HDH Ti), которые имеют крупные частицы неправильной формы со средним размером 5–52 мкм [14]. Эти порошки титана используются как в чистом виде, так и в виде легированных сплавов, например HDH Ti-6Al-4V, так и в смеси с порошком чистого титана правильной формы [15]. Данные исходные смеси за счет применения более дешевого порошка гидрида титана и HDH титана позволяют расширить применение титана в МИМ-технологии с экономической точки зрения, а также изготавливать образцы с повышенной твердостью и износостойкостью по сравнению с имеющимися на рынке материалами из чистого титана. Отрицательной стороной применения данных исходных порошков является повышенное содержание вредных примесей в смеси – кислорода и углерода, что негативно сказывается на свойствах конечных изделий – снижении прочности на разрыв и увеличении относительного удлинения образцов, увеличения пористости.

Большое внимание привлекают пористые титановые МИМ-материалы в качестве биосовместимых материалов. В работе [16] представлен гранулят для изготовления костных им-

плантатов на основе порошка титанового сплава Ti6Al4V, полученного газовым распылением, с частицами правильной сферической формы (15 мкм) с добавлением гидроксипатита ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) – основной минеральной составляющей костей (около 50 % от общей массы кости) и зубов (96 % в эмали)), а также хлорида натрия (NaCl) в качестве порообразователя. Одним из важнейших вопросов в МИМ-технологии применительно к титановым сплавам является контроль за содержанием в них кислорода и углерода в процессе производства. Так, в исследовании [17] в качестве поглотителя кислорода при изготовлении деталей из порошка HDH Ti (чистота 99,5 %) применялся порошок LaB6 (чистота 99,9 %) в качестве поглотителя кислорода. В работе [18] использовались газораспыленный сферический порошок CP-Ti с размером частиц менее 45 мкм, лигатурный сферический порошок Ti-42Nb (менее 63 мкм) с добавлением порошков Zr и Y (оба менее 45 мкм) неправильной формы. В исследовании показано, что применение редкоземельных (РЗЭ) элементов, таких как иттрий, является одним из возможных решений проблемы вредных примесей из-за их способности поглощать кислород.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. German R.M., Bose A. Injection molding of metals and ceramics. New Jersey, USA, 1997. 414 p.
2. Разработка отечественного порошкового гранулята со связующим на основе полиформальдегида для МИМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук, С.В. Игнатов, Д.В. Костин, А.С. Шульцимова // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 4. С. 8–13.
3. Effect of powder loading and testing condition on the different properties of metal injection molding parts / Ankit Kumar Pandey, Ashish, Pramod Chaudhari, Premkumar Vemula, B. Sunil, Kanhu Charan Nayak, Prashant P.Date // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. Part 8. Pp. 5492–5497. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.309
4. Influence of powder size on the moldability and sintered properties of irregular iron-based feedstock used in low-pressure powder injection molding / Atefeh A. Tafti, Vincent Demers, Guillem Vachon, Vladimir Brailovski // Powder Technology. 2023. Vol. 420. Art. 118395. doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118395
5. Rheological and mechanical assessment for formulating hybrid feedstock to be used in MIM & FFF / Juan Alfonso Naranjo, Cristina Berges, Roberto Campana, Gemma Herranz // Results in Engineering. 2023. Vol. 19. Art. 101258. doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101258
6. Effect of 17-4PH stainless steel powders interaction on feedstocks / Haihong Ma, Shuo Li, Zhesheng Jin, Yiwen Tian, Fengmei Ren, Zhengfa Zhou, Weibing Xu // Powder Technology. 2020. Vol. 372. Pp. 204–211. doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.106
7. Oxygen content control in metal injection molding of 316L austenitic stainless steel using water atomized powder / Kaiping Yua, Shulong Ye, Wei Mo, Yonghu, Lv, Heng Jiang, Rui Ma, Chi Tat, Kwok, Peng Yu // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 50. Pp. 498–509. doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.038
8. Characterization of nano / micro bimodal 316L SS powder obtained by electrical explosion of wire for feedstock application in powder injection molding / M. Krinitcyn, N. Toropkov, A. Pervikov, E. Glazkova, M. Lerner // Powder Technology. 2021. Vol. 394. Pp. 225–233. doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.061
9. Antimicrobial activity of porous metal injection molded (MIM) 316L stainless steel by Zn, Cu and Ag electrodeposition / Matti Kultamaa, Marianne Gunell, Kari Mönkkönen, Mika Suvanto, Jarkko J. Saarinen // Surfaces and Interfaces. 2023. Vol. 38. Art. 102778. doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102778
10. Effect of adding carbides on dry sliding wear behaviour of steel matrix composites processed by metal injection moulding / C. García, F. Martínez, G. Herranz, C. Berges, A. Romerob // Wear. 2018. Vol. 414–415. Pp. 182–193. doi.org/10.1016/j.wear.2018.08.010
11. Reduced sliding friction on flat and microstructured metal injection molded (MIM) WC-Co hard metals with MoS₂ composite lubricants / Christopher K. Dawari, Inziam Haq, Kari Mönkkönen, Mika Suvanto, Jarkko J. Saarinen // Tribology International. 2021. Vol. 160. Art. 107020. doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107020
12. Microstructure features of high performance soft magnetic alloy Fe-3 wt. % Si prepared by metal injection molding / Chunxia Zhou, Haojie Jiang, Chuanmu, Liu, Biao Yan, Pengfei Yan // Materials Chemistry and Physics. 2021. Vol. 273. Art. 12506. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125068

13. Magnetic properties of soft magnetic composites fabricated by injection molding of bimodal amorphous Fe₇₃Si₁₁B₁₁C₃Cr₂ and crystalline Fe₅₀Co₅₀ powders / Rui Ma, Liang Chang, Yaqiang Dong, Shulong Ye, Jiajia Si, Kefu Yao, Peng Yu // Powder Technology. 2022. Vol. 397. Art.116986. doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.030
14. Metal injection molding of high-performance Ti composite using hydride-dehydride (HDH) powder / Yanjun Liu, Yu Pan, Jianzhuo Sun, Xinxin Wu, Jinshan Zhang, Fan Kuang, Xin Lu // Journal of Manufacturing Processes. 2023. Vol. 89. Pp. 328–337. doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.064
15. A new model for predicting the flow properties of Ti-6Al-4V-MIM feedstocks / G. Thavanayagam, J.E. Swan // School of Engineering, The University of Waikato, Hamilton, New Zealand, Powder Technology. 2022. Vol. 401. Art. 117306. doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117306
16. Application of sodium chloride as space holder for powder injection molding of alloy Titanium-Hydroxyapatite composites / Mohd Yusuf Zakaria, Mohd Ikram Ramli, Abu Bakar Sulong, Norhamidi Muhamad, Muhammad Hussain Ismail // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 12. Pp. 478-486. doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.087
17. Metal injection molding of high-performance Ti composite using hydride-dehydride (HDH) powder / Yanjun Liu, Yu Pan, Jianzhuo Sun, Xinxin Wu, Jinshan Zhan, Fan Kuang, Xin Lu // Journal of Manufacturing Processes. 2023. Vol. 89. Pp. 328–337. doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.064
18. Impacts of yttrium on microstructure and tensile properties of biomedical β Ti-Nb-Zr fabricated by metal injection molding / Peng Xu, Florian Pyczak, Ming Yan, Fantao Kong, Thomas Ebel // Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 792. Art. 139816. doi.org/10.1016/j.msea.2020.139816

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ КОМПОЗИЦИИ $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$
МЕТОДОМ АЗИДНОГО СВС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕЛАМИНА
В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА УГЛЕРОДА**

Плеханов А.М., магистрант, **Майдан Д.А.**, доцент, к.т.н., доцент

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

Проведен термодинамический анализ горения систем типа $\text{Si}_x+\text{Ti}+6\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ в специализированной программе Thermo. На основании полученных данных были составлены графики зависимости расчетной температуры реакции и энтальпии от количества молей Si в исходных компонентах. В результате был сделан вывод о возможности получения искомой керамической композиции $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ методом азидного СВС.

Ключевые слова: нитрид кремния, карбид титана, термодинамический анализ, керамическая композиция, синтез

**THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE POSSIBILITY
OF OBTAINING A HIGHLY DISPERSED $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ CERAMIC COMPOSITION BY
THE AZIDE SHS METHOD USING MELAMINE AS A CARBON SOURCE**

Plekhanov A.M., Master's Degree student,
Maidan D.A., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences

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

In this work a thermodynamic analysis of the combustion of systems of the $\text{Si}_x+\text{Ti}+6\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ type was carried out in the specialized «Thermo» program. Based on the data obtained, graphs were drawn up of the dependence of the calculated reaction temperature and enthalpy on the number of moles of silicon in the initial components. As a result, it was concluded that it is possible to obtain the desired $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ ceramics composition using azide SHS method.

Keywords: silicon nitride, titanium carbide, thermodynamic analysis, ceramic composition, synthesis

В настоящее время нитрид кремния (Si_3N_4) широко используется как основной материал при производстве особо ответственных изделий и деталей, эксплуатируемых в экстремальных условиях, где применение большинства материалов невозможно в связи с высокими требованиями к механическим характеристикам и химической инертности при высоких температурах. Однако несмотря на хорошие эксплуатационные характеристики, демонстрируемые нитридом кремния, все еще остается ряд проблем, препятствующих свободному применению данного материала [1, 2]. Одной из проблем является значительная себестоимость деталей из нитрида кремния (Si_3N_4) получаемых традиционными механическими методами обработки. Это связано с быстрой деградацией и изнашиванием режущих инструментов, а также трудностью или невозможностью получения изделий сложной формы. Второй проблемой является ряд механических требований к некоторым деталям, которые не способен удовлетворить нитрид кремния [3–4].

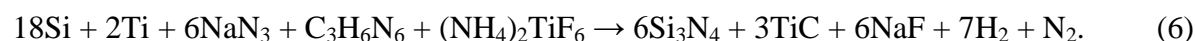
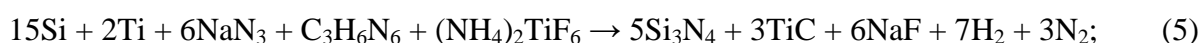
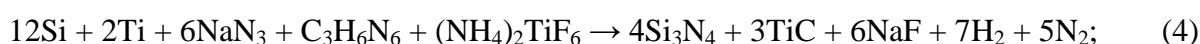
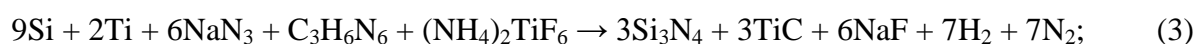
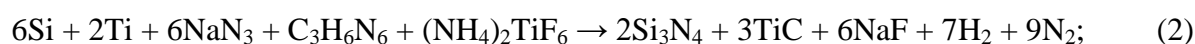
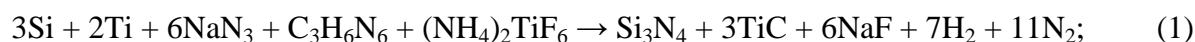
Проблемы, описанные выше, решаются путем добавления керамики со значительной износостойкостью и твердостью, например карбида титана (TiC), который имеет относительно большую область применения. Например, его можно использовать в качестве материала для напыления износостойких покрытий с помощью высокочастотного магнитрона [5].

Использование композиции $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ вместо чистого нитрида кремния (Si_3N_4) должно решить данные проблемы, так как карбид титана (TiC) значительно повысит твердость,

стойкость к износу и электропроводность, что в свою очередь позволит применить метод электроэрозионной обработки и будет соответствовать более высоким требованиям к материалу. Данную композицию уже получают, однако все существующие методы отличаются трудоемкостью или дороговизной процесса, что препятствует широкому применению данной композиционной керамики [6]. Композиция Si₃N₄–TiC может быть применена для изготовления режущего инструмента с последующим нанесением на него алмазного покрытия [6]. В свою очередь, применение азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза приведет к значительному уменьшению времени цикла производства композиции при меньших энергозатратах.

Меламин (C₃H₆N₆) в данной работе был выбран для применения не только в качестве источника углерода, но и для большего насыщения шихты атомарным азотом. Теоретически это должно привести к уменьшению количества непрореагировавших компонентов реакции, что приведет к получению более чистой композиции без примесей. В свою очередь отсутствие примесей приведет к снижению трудозатрат на дополнительную очистку материала.

Для получения высокодисперсной керамической композиции «нитрид кремния – карбид титана» по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с использованием меламин (C₃H₆N₆) в качестве источника углерода предлагается система уравнений, в которой увеличивается количество кремния в исходных компонентах реакции и тем самым изменяется соотношение нитрида кремния и карбида титана в продуктах реакции:



Данные реакции подобраны неслучайно, поскольку из расчетов, представленных далее, можно увидеть, что, контролируя количество кремния в исходной шихте, можно предсказуемо изменить параметры протекания синтеза, а это позволит подобрать оптимальное соотношение исходных компонентов для получения искомой композиции.

По относительной атомной массе и количеству молей каждого исходного компонента рассчитаем их массу для синтеза (табл. 1). Масса исходных компонентов рассчитывалась для образца диаметром 30 мм и высотой 45 мм.

Таблица 1

Масса исходных компонентов для синтеза керамической композиции «нитрид кремния – карбид титана»

Номер реакции	Масса исходных компонентов, г						Теоретический выход твердых продуктов реакции, г		
	Si	Ti	NaN ₃	C ₃ H ₆ N ₆	(NH ₄) ₂ TiF ₆	Сумма	Si ₃ N ₄	TiC	NaF
1	1,95	2,22	9,04	2,92	4,59	20,71	3,25	4,16	5,84
2	3,62	2,06	8,39	2,71	4,26	21,04	6,03	3,86	5,42
3	5,07	1,92	7,82	2,53	3,97	21,31	8,44	3,60	5,05
4	6,34	1,80	7,33	2,37	3,72	21,56	10,55	3,38	4,74
5	7,45	1,69	6,90	2,23	3,50	21,77	12,41	3,18	4,46
6	8,44	1,60	6,51	2,11	3,31	21,97	14,06	3,00	4,21

Из табл. 1 видно, что с увеличением количества кремния в исходных компонентах количество нитрида кремния в продуктах реакции растет по отношению к карбиду титана.

Термодинамический анализ проводился с использованием программы Thermo. Расчет выполнялся двумя способами при давлении внешнего азота 4 МПа.

Первый расчет проводился при условии, что в результате реакции образуются только нитрид кремния, карбид титана, фторид натрия и газы, то есть строго в соответствии с формулами (1)–(6). Результаты термодинамических расчетов представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

Результаты расчета адиабатических температур реакций (1)–(6)

Номер реакции	Адиабатическая температура реакции, $T_{ад}$, К
1	2175
2	2410
3	2573
4	2689
5	2776
6	2829

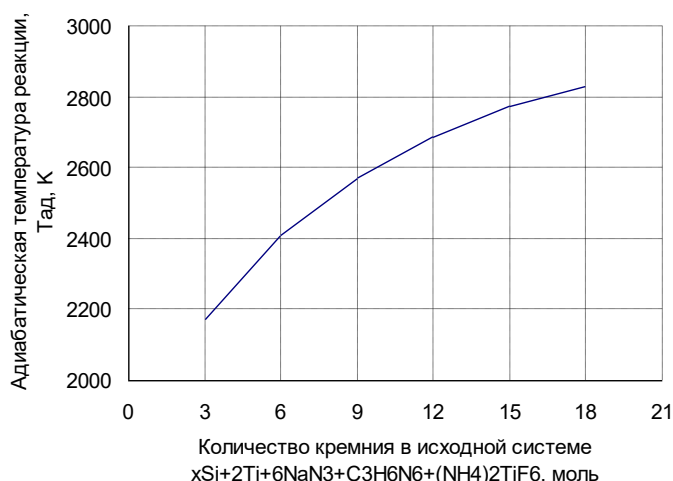
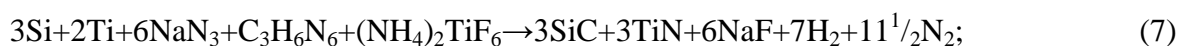
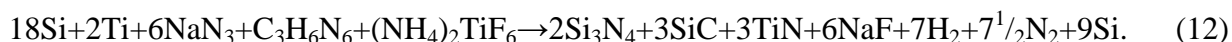
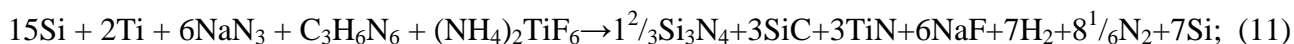
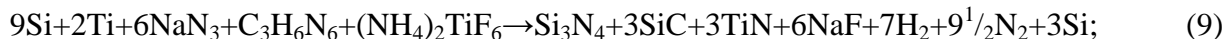


Рис. 1. Зависимость адиабатических температур реакций (1)–(6) от количества исходного кремния

Из табл. 2 и зависимости, представленной на рис. 1, видно, что при увеличении количества молей компонента x , в нашем случае кремния, в исходном составе реакции происходит рост адиабатической температуры реакций, что говорит об увеличении количества энергии, высвобождающейся при синтезе искомой композиции. Все предложенные реакции имеют температуру, достаточную для их самопроизвольного протекания в форме горения.

Во втором расчете рассматривалась возможность получения не только композиций, состоящих из нитрида кремния и карбида титана, но и соединений, образующихся из составляющих их химических элементов и побочных продуктах реакции. При выполнении термодинамических расчетов данным методом оказалось, что в результате протекания реакций (1)–(6) карбид титана не образуется, но образуются нитрид кремния, карбид кремния, нитрид титана и свободный кремний. В соответствии с расчетами получились следующие уравнения реакций:





Результаты термодинамических расчетов по реакциям (7)–(12) представлены в табл. 3 и на рис. 2.

Таблица 3

Результаты расчета адиабатических температур реакций (7)–(12)

Номер реакции	Адиабатическая температура реакции, $T_{ад}$, К
7	2132
8	2277
9	2275
10	2272
11	2267
12	2265

Из табл. 3 и зависимости, представленной на рис. 2, видно, что с увеличением количества кремния в исходных компонентах адиабатические температуры реакций практически не изменяются, за исключением реакции (7), в которой, в отличие от остальных реакций, не образуется нитрид кремния и свободный кремний. Реакции (7)–(12) имеют достаточно высокие температуры для их самопроизвольного протекания в форме горения. Однако в данных реакциях не образуется один из компонентов целевой композиции – карбид титана. Кроме того, в реакциях (8)–(12) образуется свободный кремний, который необходимо будет удалять из нитридно-карбидной композиции.

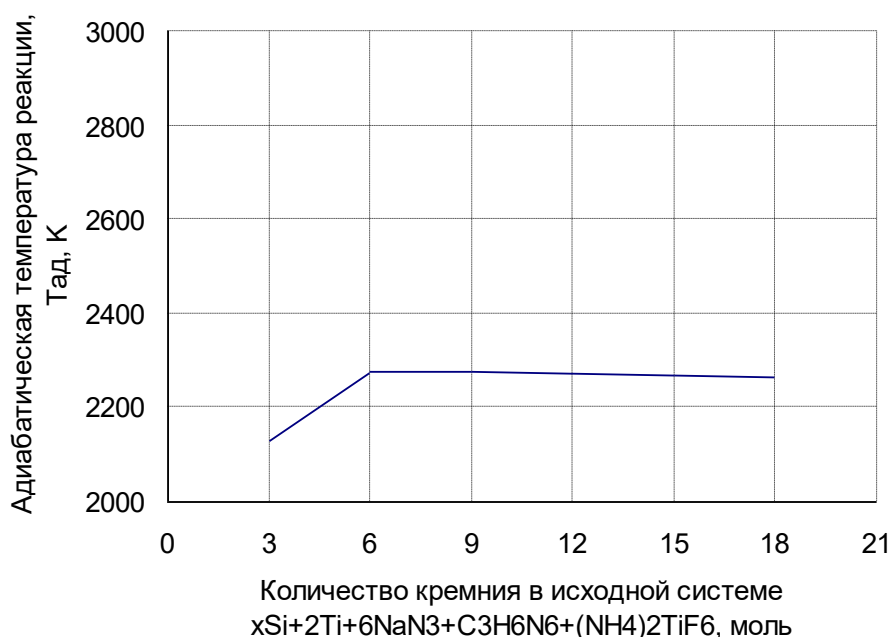


Рис. 2. Зависимость адиабатических температур реакций (7)–(12) от количества исходного кремния

Выводы

1. Адиабатические температуры всех рассмотренных реакций достаточны для их самопроизвольного протекания в форме горения.

2. После проведения синтеза в реакторе СВС-Аз необходимо тщательно выполнить рентгенофазовый анализ продуктов реакций для определения наличия в них карбида титана, так как теоретические расчеты показали, что есть вероятность, что он может не синтезироваться из выбранных реакций и потребуется их замена или корректировка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учеб. пособие. М.: Машиностроение-1, 2007. 568 с.
2. Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М., Верещагин В.И. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных нитридсодержащих керамических материалов. Новосибирск: Наука, 2012. 260 с.
3. Амосов А.П., Бичуров Г.В. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов. М.: Машиностроение-1, 2007. 526 с.
4. Bichurov G. The Use of Halides in SHS Azide Technology // *Int J Self-Propagating High-Temp Synth.* 2000. Vol. 9, No. 2. Pp. 247–268.
5. Abegunde Olayinka Oluwatosin, Akinlabi Esther, Philip Oladijo. Influence of nanostructured-TiC coating on the mechanical properties of Ti6Al4V alloys grown by RF magnetron sputtering // *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Toronto 2019.* Pp. 23–25.
6. Kumar Sanjay, Wani M.F. Friction and wear properties of Si₃N₄/TiC ceramic composite under nano lubrication // *Journal of Physics: Conference Series* 1240. 2019. 012134.
7. Fabrication of cutting tools based on β-Si₃N₄-TiC composite recovered with CVD-diamond / M.A. Lanna, C. Santos, K. Strecker, O.M.M. Da Silva, C.R.M. Da Silva. // *Materials Science Forum* 455–456. 2004. Pp. 609–613.

УДК 621.822.6

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА И ПРИЧИН ДЕФЕКТОВ КОМПЕНСАЦИОННОГО КОЛЬЦА ИЗ СТАЛИ ШХ15

Пугачева Т.М., к.т.н., с.н.с., доцент, **Котельников Д.В.**, магистрант

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: t.pugacheva15@yandex.ru*

Приведены результаты исследования характера и причин появления окружных трещин по краю поверхности компенсационного кольца подшипника качения из стали ШХ15 в состоянии поставки. Установлено: микроструктура и твердость кольца соответствует требованиям конструкторской документации, а дефект представляет собой раскатанную трещину исходного металла, которая получила свое дальнейшее развитие и усугубилась в процессе изготовления кольца при горячей обработке давлением и термической обработке.

Ключевые слова: подшипник качения, кольцо компенсационное, трещины, горячая обработка давлением

ANALYSIS OF THE CHARACTER AND CAUSES OF DEFECTS IN THE COMPENSATION RING MADE OF STEEL ШХ15

Pugacheva T.M., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences,
Kotelnikov D.V., Master's Degree student

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: t.pugacheva15@yandex.ru*

The results of a study of the nature and causes of circumferential surface edge cracks of the compensation ring of a rolling bearing made of ШХ15 steel in the delivered condition are presented. It has been established: the microstructure and hardness of the ring meets the design documentation requirements, and the defect is a rolled crack of the original metal, which received its further development and aggravation during the ring manufacturing during hot pressure treatment and heat treatment.

Keywords: rolling bearing, compensation ring, cracks, hot pressure treatment

Компенсационное кольцо – это кольцо, сопряженное с уплотнением и установленное между передней крышкой и одним внутренним кольцом базового подшипника, а также между упорным кольцом и другим внутренним кольцом базового подшипника [1]. Основная задача компенсационного кольца подшипника – обеспечить свободное движение вала подшипника вдоль его оси, компенсируя малые осевые смещения. Это особенно важно в случае изменения размеров и формы подшипника в процессе работы, например, из-за тепловых расширений или других деформаций. Оно также сопряжено с уплотнением и обеспечивает его эффективность, предотвращая попадание грязи и влаги внутрь подшипника. Повреждения и дефекты компенсационного кольца могут ухудшить герметичность подшипника, что приведет к загрязнению и быстрому износу, могут вызвать дисбаланс вращающихся частей, что увеличивает вибрацию и износ, а такие дефекты, как трещины, могут привести к внезапному отказу в работе всего подшипника. Таким образом, компенсационное кольцо является критически важным компонентом для обеспечения долговечности и надежности подшипников, особенно в условиях интенсивной эксплуатации и высоких нагрузок. Его целостность и отсутствие дефектов напрямую влияют на безопасность и эффективность работы механизмов, в которых используются подшипники.

Цель работы: исследование характера и причин дефекта в виде трещин компенсационного кольца подшипника.

Для идентификации химического состава, оценки качества металла, термической обработки и выявления причин технологических дефектов использовали оптический эмиссионный

спектрометр SPECTROMAXx, токовихревой дефектоскоп «ВИПКОН-М», микроскоп металлографический OLYMPUS GX-51, стереомикроскоп МБС-10, твердомер ТК-2М, рентгеновский дифрактометр XRD-6000.

Визуальный осмотр на исследуемом кольце обнаружил трещины, расположенные по краю наружной цилиндрической поверхности (с противобазовой стороны), местами выходящие на прилегающую фаску и ориентированные по окружности. Трещины расположены в двух секторах кольца (схематично отмеченных на рис. 1).

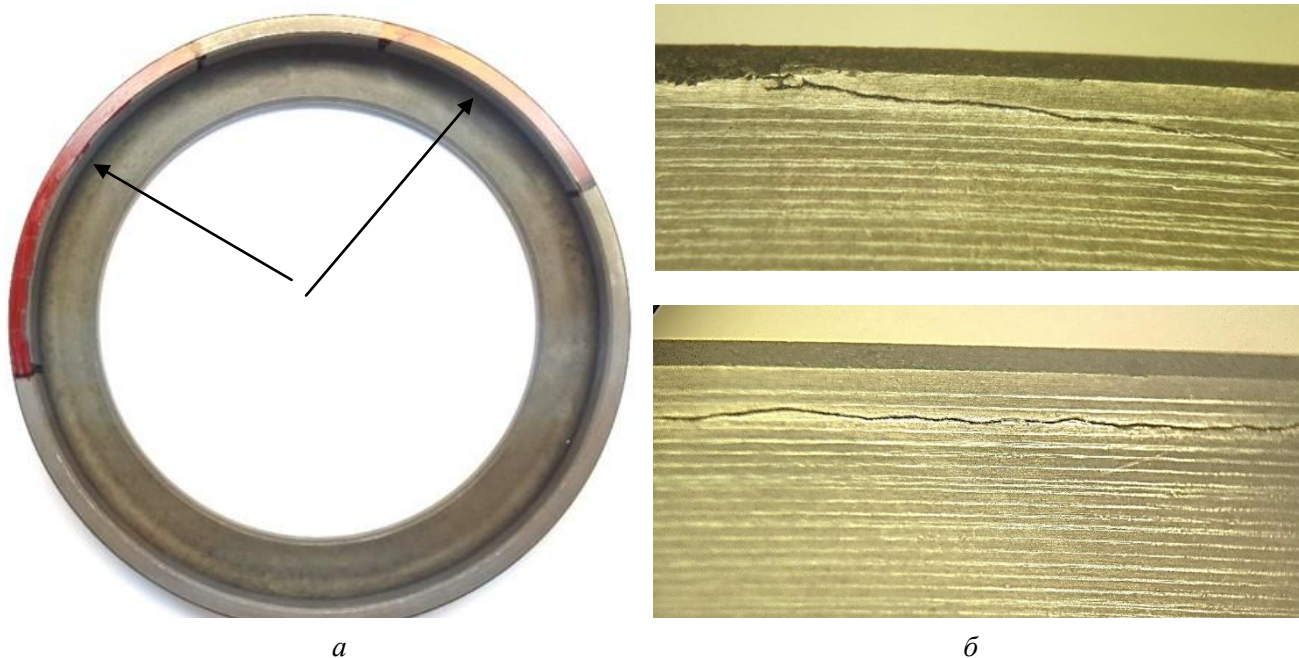


Рис. 1. Месторасположение трещин (а) и внешний вид трещин (б)

Магнитно-люминесцентная дефектоскопия исследуемого кольца выявила индикаторные рисунки по местам расположения трещин (рис. 2). Дефектов в других областях кольца не выявлено.



Рис. 2. Индикаторные рисунки после магнитно-люминесцентной дефектоскопии

При анализе сканограммы, полученной токовихревым методом [2], было обнаружено несколько областей локальной неоднородности, расположенных как по месту трещин, так и в местах, где трещины отсутствуют (рис. 3). Последующим холодным травлением кольца в выявленных областях мягких пятен, прижогов и обезуглероживания обнаружено не было (рис. 4).

Наличие характерных графических сигналов в местах с отсутствием трещин, вероятнее всего, связано с микропластической деформацией в процессе изготовления.

Химический состав кольца соответствует марке стали ШХ15-Ш.

Твердость исследуемого кольца (замерялась по торцу) составила 57,5-59,0 HRC, что соответствует требованиям чертежа – 50–60 HRC.

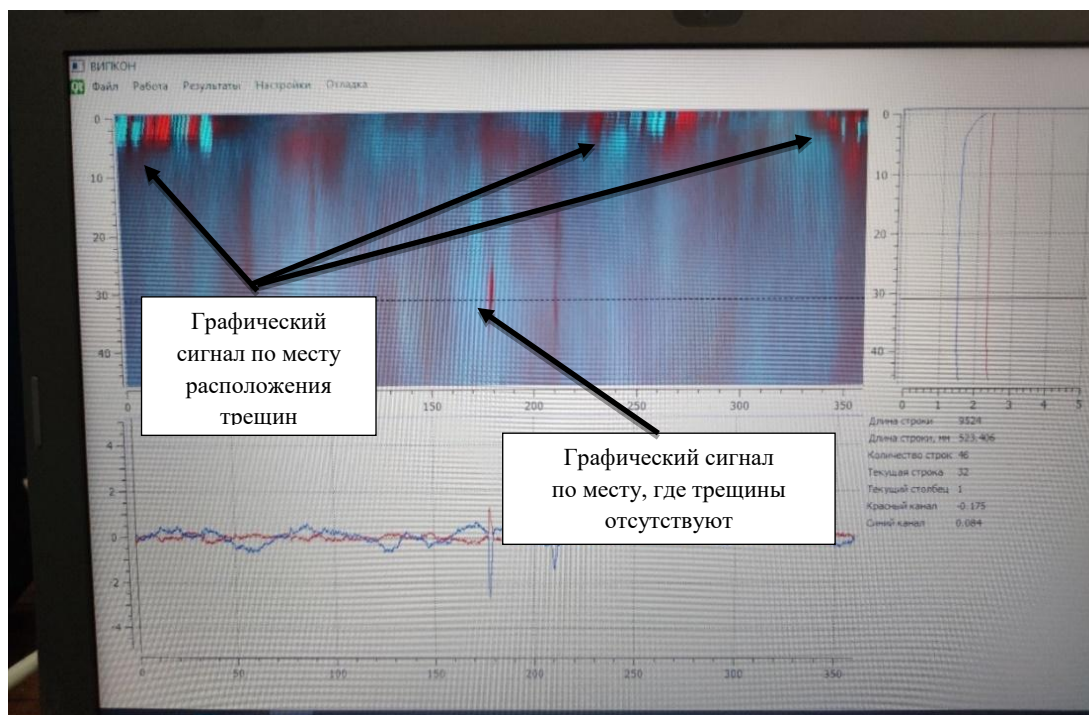


Рис. 3. Сканограмма исследуемого кольца

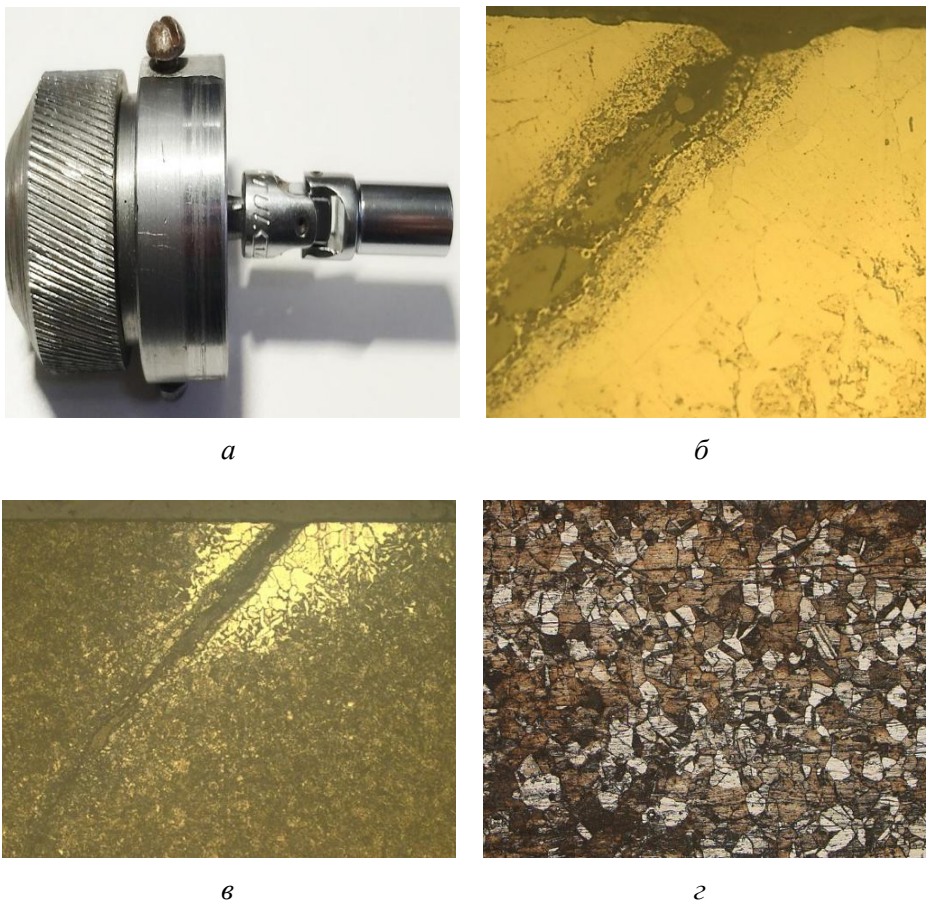


Рис. 4. Внешний вид трещин после холодного травления

Загрязненность металла исследуемого кольца неметаллическими включениями (оксидами, сульфидами, глобулями), оцененная по шкалам ГОСТ 801-78, не превышает 1 балла. Полосчатость микроструктуры кольца, оцененная по шкале № 5 ГОСТ 801-78, не превышает 1 балла, а карбидная сетка, оцененная по шкале № 4 ГОСТ 801-78, не превышает 3 баллов. Это соответствует требованиям технической документации.

Методом рентгенофазового анализа на хромовом излучении ($\text{Cr K}\alpha$) было установлено отсутствие остаточного аустенита в металле исследуемого кольца. При микроанализе продольного сечения относительно оси кольца по месту дефекта установлено, что дефект имеет вид трещины, направленной под углом порядка 45° к поверхности. Трещина у поверхности более широкая с постепенным сужением вглубь, имеет разветвленный конец. Стенки трещины заполнены окалиной, прилегающие к ним участки обезуглерожены и насыщены диффузионными оксидами (рис. 5), выделившимися в твердом металле по месту дефекта вследствие диффузии кислорода, происходящей в процессе длительной выдержки заготовки при высокой температуре. Это свидетельствует о том, что трещина имеет металлургический характер происхождения [3].

Таким образом, микроструктура и твердость компенсационного кольца соответствуют требованиям конструкторской документации, а выявленный дефект представляет собой раскатанную трещину исходного металла, которая получила свое дальнейшее развитие и усугубилась при последующей горячей обработке давлением и термической обработке.



*Рис. 5. Поперечное сечение трещин:
а, б – $\times 500$, в, з – $\times 100$*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 32769-2014. Подшипники качения. Узлы подшипниковые конические букс железнодорожного подвижного состава. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014.
2. Автоматизированная система вихретокового контроля деталей подшипников / А.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, С.И. Зайцев, С.А. Игнатъев // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. 2005. № 1 (7). Т. 2. С. 114–122.
3. Исследование причин образования поверхностных дефектов рельсов / А.И. Троцан, В.В. Каверинский, И.М. Кошулэ, А.О. Носоченко // Вестник Приазовск. гос. техн. ун-та. Серия: Технические науки. 2012. № 4 (9). С. 106–113.

ТРАНСФОРМАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКА ИЗ СТАЛИ ШХ15-Ш ВСЛЕДСТВИЕ АНОМАЛЬНОГО РАЗОГРЕВА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Пугачева Т.М., к.т.н., с.н.с., доцент, **Котельников Д.В.**, магистрант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: t.pugacheva15@yandex.ru

Приведены результаты исследования изменения твердости и трансформации микроструктуры деталей подшипника электродвигателя из стали ШХ15-Ш. Было установлено, что в процессе эксплуатации вследствие аномального разогрева подшипника произошло снижение твердости до 40,0-44,0 HRC, а также формирование микроструктуры пластинчатого перлита, сварка внутренних колец и образование полостей в центре шариков.

Ключевые слова: подшипник, микроструктура, твердость, нагрев при эксплуатации

HARDNESS AND MICROSTRUCTURE TRANSFORMATION OF BEARING PARTS MADE FROM STEEL ШХ15-Ш DUE TO ANOMAL HEATING DURING OPERATION

Pugacheva T.M., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,

Kotelnikov D.V., Master's Degree student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: t.pugacheva15@yandex.ru

The results of a study of hardness changes and microstructure transformation of electric motor bearing parts made of ShKh15-Sh steel are presented. It was found that during operation, due to abnormal heating of the bearing, a decrease in hardness to 40.0-44.0 HRC occurred, the formation of a lamellar pearlite microstructure, welding of the inner rings and the formation of cavities in the center of the balls.

Keywords: bearing, microstructure, hardness, heating during operation

Подшипники качения являются важнейшим узлом вращения машин и механизмов. Теоретически при правильном монтаже, расчетных условиях эксплуатации и оптимальной смазке подшипники не должны разогреваться выше 65 °С. Согласно ГОСТ 183-74 [1] для электрических машин общего применения предельная допускаемая температура подшипников качения составляет 100 °С. При более высоких температурах ухудшаются свойства смазки, а при нагреве выше температур технологического отпуска (160–180 °С) металла деталей подшипника (сталь ШХ15-Ш) начинает изменяться их структурно-фазовое состояние, что сопровождается ускоренным износом.

Целью работы было исследование трансформации микроструктуры и твердости деталей подшипника электродвигателя после эксплуатации.

Исследование проводилось на образцах, изготовленных из наружных, внутренних колец и шариков исследуемого подшипника (рис. 1).

Химический состав определяли на оптическом эмиссионном спектрометре СРЕКТРОМАХ, макроанализ проводили с использованием стереомикроскопа МБС-10, микроструктуру изучали после травления подготовленных шлифов в 4-процентном спиртовом растворе азотной кислоты с использованием металлографического микроскопа OLYMPUS GX-51, твердость измеряли с использованием твердомера Zwick 3212.

По результатам спектрального анализа (см. таблицу) установлено, что все детали подшипника были изготовлены из стали ШХ15-Ш.



Рис. 1. Общий вид деталей исследуемого подшипника:
а – наружные кольца с шариками и фрагментами шариков,
б – приваренные друг к другу внутренние кольца

Химический состав деталей подшипников

Тип детали	Массовая доля элементов, %					
	C	Cr	Mn	Si	P	S
Наружное кольцо 1	0,99	1,41	0,28	0,29	0,018	0,004
Наружное кольцо 2	0,99	1,41	0,28	0,31	0,018	0,004
Внутреннее кольцо 1	1,03	1,45	0,33	0,27	0,017	0,003
Внутреннее кольцо 2	1,01	1,42	0,32	0,27	0,016	0,003
Шарики	1,02	1,43	0,28	0,27	0,013	0,003
Норма по ГОСТ 801-78 для стали ШХ15-Ш	0,95–	1,30–	0,20–	0,17–	Не более	
	1,05	1,65	0,40	0,37	0,025	0,01

Анализ внешнего вида деталей подшипника показал:

1. Все поверхности наружных колец черного цвета, местами (желоб, наружная цилиндрическая поверхность) с окисной пленкой синего оттенка. На дорожках качения наружных колец имеются участки налипшего металла. Дорожка качения и часть базового бортика одного из колец значительно раскатаны с выдавливанием кольцевого заусенца на этот бортик. На наружных цилиндрических поверхностях колец имеются высветленные кольцевые полосы трения.

2. Внутренние кольца приварены друг к другу большими торцами, все поверхности черного цвета. Дорожки качения и бортики грубо и неравномерно раскатаны по окружности (в особенности на одном из колец – с потерей геометрической формы) с выдавливанием металла на края торцов. На дорожках качения имеются участки окисной пленки желтого и синего оттенков.

3. Несколько шариков сохранили сферическую форму, но большая часть шариков имеет неправильную форму вследствие деформации. Все шарики и фрагменты шариков черного цвета. Шарики, в целом сохранившие сферическую форму, покрыты налипшим и прикатанным металлом, на поверхности шариков имеются многочисленные грубые намины.

Окраска деталей подшипника, налипание металла на рабочие поверхности, существенное изменение формы шариков, сварка внутренних колец и другие выявленные особенности

свидетельствуют об аномальном нагреве подшипника в процессе эксплуатации, что должно соответствующим образом отразиться изменением твердости и трансформацией микроструктуры.

Твердость материала колец и шариков замеряли по Виккерсу при нагрузке 5 кгс в поперечных сечениях колец и шариков (рис. 2).

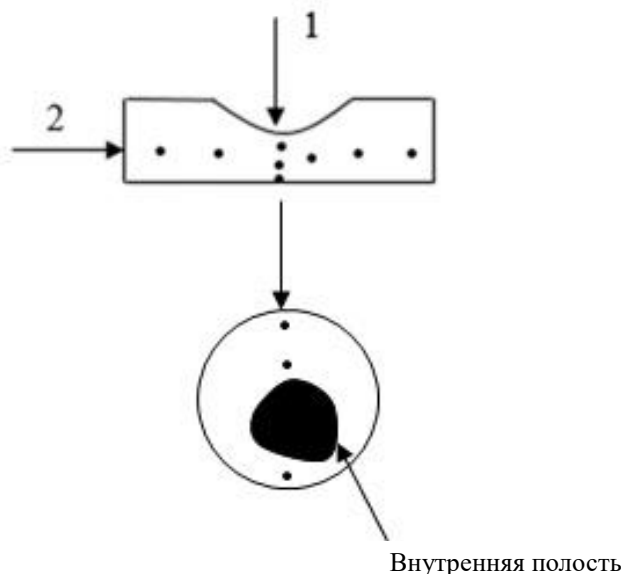


Рис. 2. Схема замера твердости на деталях подшипника

Значения твердости в переводе на шкалу HRC составили:

1. Наружное кольцо 1:
 - направление 1: 53,4; 47,0; 49,9.
 - направление 2: 52,4; 51,9; 48,4; 51,9.
2. Наружное кольцо 2:
 - направление 1: 50,9; 52,4; 54,4.
 - направление 2: 53,4; 54,4; 52,4; 50,5.
3. Внутреннее кольцо 1:
 - направление 1: 45,1; 44,5; 43,0.
 - направление 2: 45,5; 44,5; 44,1; 44,5.
4. Внутреннее кольцо 2:
 - направление 1: 42,0; 42,5; 40,0.
 - направление 2: 43,0; 42,5; 43,5; 42,0.
5. Шарика (3 штуки):
 - 44,1; 44,5; 44,0.
 - 44,5; 43,5; 44,1.
 - 42,0; 43,5; 43,5.

Твердость всех деталей подшипников заметно ниже требуемой технической документацией (не ниже 58,0–60,0 HRC), что свидетельствует о существенном и неравномерном нагреве подшипника в процессе эксплуатации.

Микроструктуру изучали на поперечных сечениях колец и шариков (рис. 3).

На одном наружном кольце наблюдается зона вторичной закалки (что свидетельствуют о нагреве этой зоны выше критической точки $A_{c1} = 724\text{ }^{\circ}\text{C}$), сопровождаемая зоной вторичного отпуска общей глубиной до $\approx 2,4$ мм (см. рис. 3). Микроструктура металла колец по всему сечению (кроме зоны вторичной закалки на одном из колец) состоит из продуктов среднего отпуска мартенсита и мелких избыточных карбидов (рис. 4), что в совокупности с твердостью свидетельствует о нагреве наружных колец (кроме зоны вторичной закалки) до температур более $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

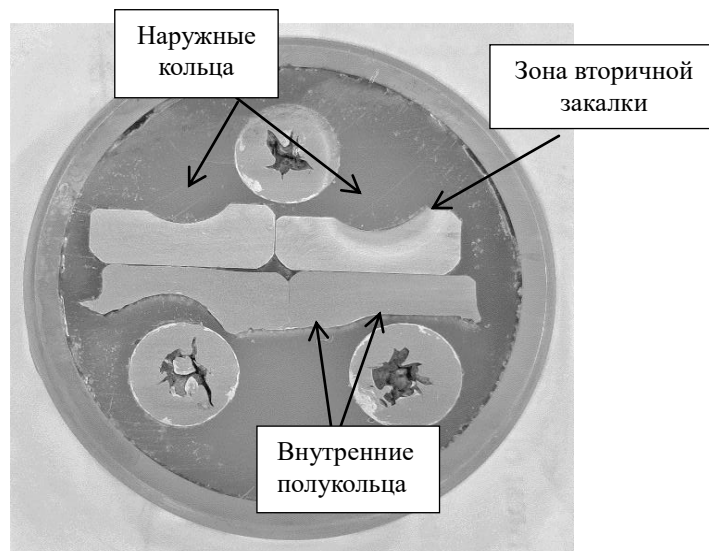


Рис. 3. Шлифы для микроанализа деталей подшипников

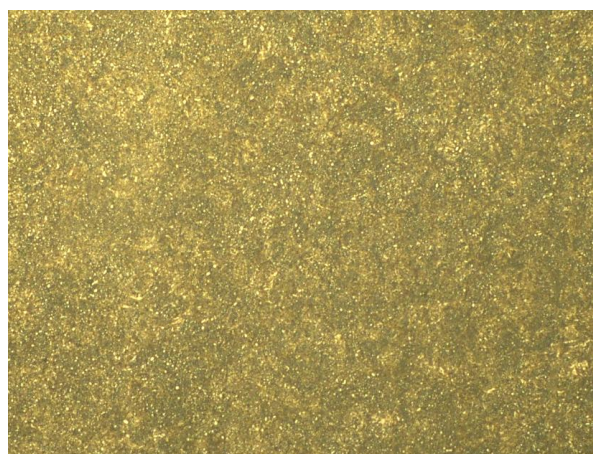


Рис. 4. Микроструктура наружных колец $\times 500$

Микроструктура металла внутренних колец и шариков по всему сечению состоит из пластинчатого перлита различной степени дисперсности с участками карбидной сетки (рис. 5), что в совокупности с твердостью свидетельствует об их нагреве до температур гомогенизации аустенита (примерно выше $880\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$) и последующем медленном охлаждении.



Рис. 5. Микроструктура внутренних колец и шариков $\times 500$

В сечении шариков обнаружены полости разного размера и формы (см. рис. 4). Согласно [1, 2] нарушение монолитности металла и образование внутренних полостей в сердцевине шариков связано с действием высоких температур при наличии весьма неравномерной по сечению горячей деформации. Вследствие относительно большой раскатки поверхностных слоев по сравнению с более глубоко расположенными слоями возникают нормальные напряжения, стремящиеся растянуть центральную часть, в результате чего возникает и расширяется полость [2].

Таким образом, в процессе эксплуатации кольца и шарики исследованного подшипника подвергались неравномерному аномально высокому нагреву. В результате чего произошел отпуск наружных колец со снижением твердости до 47,0–54,0 HRC. Внутренние кольца и шарики подверглись нагреву выше критических точек и более интенсивной пластической деформации, в результате чего произошло сваривание колец по широкому торцу, образование внутренних полостей в шариках и снижение твердости до 40,0–44,0 HRC.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия.
2. Зайцев А.М., Коросташевский Р.Б. Эксплуатация авиационных подшипников качения. М.: Транспорт, 1968. 224 с.
3. Шейн А.С. Труды института. Условия и причины образования внутренних полостей в шариках подшипников качения. М.: ВНИПП, 1964.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАНТАЛА В КАЧЕСТВЕ ЛЕГИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ СТАЛИ 316L

Романова А.М. ✉, аспирант, Горунов А.И., д.т.н., профессор, Наурзалинова Л.К., студент

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация
E-mail: rom.na18@mail.ru*

Рассматривается возможность создания нового материала путем добавления легирующего элемента в порошковый материал. Изготовление образцов осуществлялось с помощью технологии прямого лазерного нанесения металла. В качестве легирующего элемента для стали 316L выступает порошок Ta. Исследуется его влияние на структуру стали, перспективы использования полученного материала. В результате при микроскопическом исследовании замечено сильное влияние Ta на морфологию наплавленных образцов.

Ключевые слова: тантал, сталь, прямое лазерное нанесение металла, структура, образцы, металлический порошок

PROSPECTS FOR USING TANTALUM AS AN ALLOYING ELEMENT FOR 316L STEEL

Romanova A.M. ✉, PhD student, Gorunov A.I., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Naurzalinova L.K., student

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation
E-mail: rom.na18@mail.ru*

The article discusses the possibility of creating a new material by adding an alloying element to the powder material. The samples were produced using direct laser deposition of metal technology. The alloying element for 316L steel is Ta powder. Its influence on the structure of steel and the prospects for using the resulting material are investigated. As a result, microscopic examination revealed a strong influence of Ta on the morphology of the deposited samples.

Keywords: tantalum, steel, direct metal deposition, structure, sample, metal powder

Тантал – редкоземельный, коррозионностойкий, тугоплавкий металл, обладающий хорошими механическими и технологическими характеристиками, устойчив к агрессивным средам. Одной из особенностей также является отличная биосовместимость. Единственные недостатки сплава – стоимость и малое содержание металла в земной коре.

В ходе патентного поиска стальных материалов, содержащих в качестве легирующего элемента тантал, выяснилось, что он способствует улучшению прочностных характеристик стали, измельчению зерна, повышению трещиностойкости изделия, а также увеличивается срок службы изделия за счет коррозионной стойкости, улучшаются прочностные характеристики [1–3]. В исследовании [4] тантал наносится на поверхность стали 316L методом магнетронного распыления на постоянном токе в качестве защитного покрытия толщиной 1,504 мкм, 3,809 мкм, 6,083 мкм. Результат показал, что покрытие образует прочное соединение с поверхностью стальных образцов, имеет отличные адгезионные свойства, а также взаимодействует с элементами, входящими в состав стали 316L.

В настоящем исследовании порошок тантала ТаПМ (ТУ 95-250-74) добавлялся в порошковый материал AISI 316L (ASTM A240), образуя механическую смесь. Металлические порошки смешаны в пропорциях 5 % – Та, 95 % – 316L (63–90 мкм). Химический состав порошков представлен в табл. 1 и табл. 2. При печати тестовых образцов выяснилось, что фракция порошка ТаПМ (5–63 мкм) не соответствует заявленным характеристикам, зерна

сцеплены между собой. В конечном итоге потребовалась дополнительная механическая обработка тантала для получения нужной фракции. Принято решение для исследования использовать порошок фракции, заявленной производителем (5–63 мкм) и фактического размера (> 63 мкм).

Таблица 1

Химический состав стали AISI 316L, %

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe
< 0,03	< 2,0	< 0,045	< 0,03	< 1,0	16,0–18,0	10,0–14,0	2,0–3,0	< 0,5	Остальное

Таблица 2

Химический состав порошка ТаПМ, %

Mn	0,00014	Ti	< 0,0003	Co	< 0,0001	O	0,17	Cu	0,00035
Mg	0,00016	Cr	0,00032	Na	< 0,0001	C	< 0,005	Ca	< 0,0003
Ni	0,00029	Sn	0,00010	H	< 0,005	Si	< 0,001	Nb	0,0029
Al	< 0,0003	Zr	< 0,0003	N	0,0026	Fe	< 0,001	W	< 0,0003
								Mo	< 0,0001

Металлические порошки просушены в электропечи при температуре 60 °С в течение часа, пропорции взвешены на электронных весах специального класса точности. После смешивания порошков емкость с содержимым помещена во встряхивающий смеситель для получения однородной текстуры. Перемешивание массы осуществлялось в течение 10 минут. Также стоит отметить, что перед каждым процессом наплавки образцы подвергались сушке. Питатели 3D-принтера тщательно вычищались во избежание попадания нежелательных частиц.

Печать образцов осуществлялась с помощью 3D-принтера InssTek MX-mini, использующего технологию прямого лазерного нанесения металла. Выбраны следующие характеристики печати: мощность лазерного излучения – 180 и 200 Вт; скорость движения сопла – 0,45 м/мин; скорость подачи порошкового материала – 4 г/мин; траектория движения – зиг-заг. Код траектории движения лазерной головки описан с помощью G-code. На рис. 1 представлены готовые к исследованию напечатанные образцы.

С помощью электроэрозионной обработки образцы разрезаны в продольном и поперечном сечении для дальнейшего исследования. Для удобства образцы запечатаны в шайбы, отшлифованы и отполированы до зеркального блеска. Также стоит отметить, что в момент шлифовки на образцах образовывались характерные царапины, которые не удалось устранить полностью. Связано это с тем, что частицы тантала не смывались с поверхности шлифовального круга и за счет высокой твердости материала образовывались глубокие царапины. Принято решение использовать текущий результат для исследования.

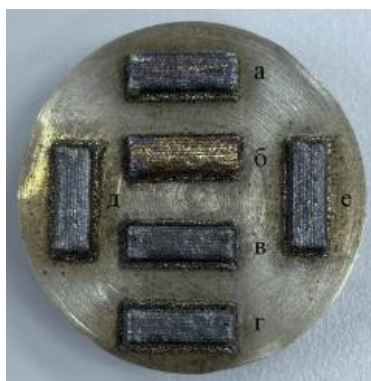


Рис. 1. Образцы, напечатанные технологией прямого лазерного нанесения металла:

a – 180 Вт, 316 L; *б* – 200 Вт, 316L; *в* – 180 Вт, Та < 63 мкм;
г – 200 Вт, Та < 63 мкм; *д* – 200 Вт, Та > 63 мкм; *е* – 180 Вт, Та > 63 мкм

При проведении микроскопических исследований (рис. 2) выявлено, что средние показатели высоты и ширины образцов соответствуют значениям по длине и ширине, запрограммированным G-code, но отличным от заявленных показателей высоты. При одних и тех же режимах печати для стали и порошковой смеси высота наплавленных образцов сильно различалась. Такая проблема обусловлена тугоплавкостью тантала и его влиянием на химические элементы, входящие в состав стали.

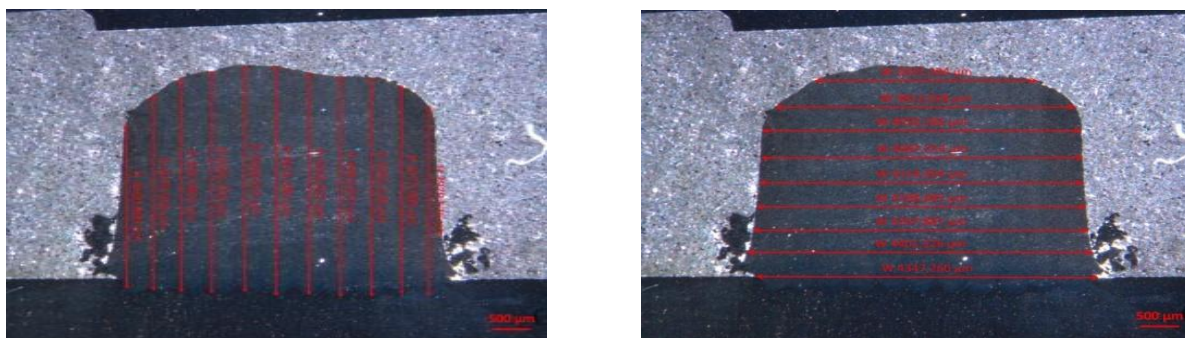


Рис. 2. Микроскопическое исследование образцов: 200 Вт, Та < 63 мкм

Элементный анализ отдельной частицы тантала показал максимальное содержание Та в центре частицы (99 %), на границе частицы наблюдалось взаимодействие тантала с элементами, входящими в состав стали 316L. Выше границы частицы заметен рост кристаллов иной морфологии, а также измельчение зерна стального материала.

В результате исследования изучалась перспектива использования тантала в качестве легирующего элемента. Выяснилось, что при печати порошком, содержащим Та, высота наплавленных образцов имеет значительно меньший размер и порошковая смесь становится тугоплавкой, в отличие от чистого порошка AISI 316L. Тантал входит в активное взаимодействие с легирующими элементами стали. Также для подтверждения теории о влиянии тантала на коррозионную стойкость стали требуются дополнительные исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23-29-00219.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сталь: пат. 1122738 СССР. № 3413612; заявл. 82.03.26; опубл. 84.11.07, Бюл. № 41. 3 с.
2. Пат. 2531216 Рос. Федерация. № 2012143206/02. Высокопрочный с высоким отношением предела текучести к пределу прочности стальной лист, высокопрочный с высоким отношением предела текучести к пределу прочности холоднокатаный стальной лист; заявл. 12.10.09; опубл. 14.10.20, Бюл. № 29. 35 с.
3. Пат. 2327796 Рос. Федерация. № 2006144253/02. Литая сталь; заявл. 06.12.12; опубл. 08.06.27, Бюл. № 18. 3 с.
4. Wear behavior and microhardness studies of tantalum (Ta)-coated 316L stainless steel by DC magnetron sputtering for the orthopedic applications / Dileep Pathote [et al.] // Journal of Materials Science. 2022. V. 57. Pp. 21039–21056. DOI: 10.1007/s10853-022-07939-6.

ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ КАРБИДА ТИТАНА, СИНТЕЗИРОВАННОЙ В РАСПЛАВЕ, И ТЕРМООБРАБОТКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АК10М2Н

Шерина Ю.В., аспирант, **Луц А.Р.**, к.т.н., доцент

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: yulya.makhonina.97@inbox.ru*

Показано влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана, синтезированной методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в расплаве, и термической обработки на триботехнические свойства (коэффициент термического линейного расширения, коэффициент трения, температура саморазогрева, износостойкость, задиростойкость) промышленного алюминиевого сплава марки АК10М2Н. Выявлено, что армирование керамической фазой в количестве 10 масс. % приводит к сохранению уровня КТЛР, значительному снижению коэффициента трения и повышению уровня износо- и задиростойкости.

Ключевые слова: композиционный материал, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, карбид титана, АК10М2Н, трибология

INFLUENCE OF REINFORCEMENT WITH HIGHLY DISPERSED PHASE OF TITANIUM CARBIDE SYNTHESIZED IN THE MELT AND HEAT TREATMENT ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF AK10M2N ALLOY

Sherina Yu.V., PhD student, **Lutz A.R.**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: yulya.makhonina.97@inbox.ru*

This paper shows the influence of reinforcement with highly dispersed titanium carbide phase synthesized by the method of self-propagating high-temperature melt synthesis and heat treatment on tribotechnical properties (coefficient of thermal linear expansion, friction coefficient, self-heating temperature, wear resistance, hadiro resistance) of industrial aluminum alloy AK10M2N. It is revealed that reinforcement with ceramic phase in the amount of 10 wt. % leads to preservation of CTLR level, significant reduction of friction coefficient and increase of wear and scuff resistance.

Keywords: composite material, self-propagating high-temperature synthesis, titanium carbide, AK10M2N, tribology

По мере развития техники в современном мире растут и удельные нагрузки, и скорости вращения трущихся деталей. В связи с этим трибологическое материаловедение продолжает оставаться одним из самых актуальных направлений для исследований. Традиционно в качестве антифрикционных материалов наибольшее применение имеют бронзы, баббиты и чугуны. Однако перечисленные материалы имеют ряд недостатков: так, бронзы не обладают хорошей прирабатываемостью, баббиты не отличаются высокой механической прочностью, а чугуны не имеют достаточного уровня антифрикционных свойств и могут применяться лишь при малых удельных давлениях и скоростях [1].

Однако для тяжелонагруженных форсированных двигателей помимо антифрикционных свойств требуется также высокий уровень физико-механических характеристик и жаропрочность. В этих случаях применяют алюминиевые сплавы с высоким содержанием кремния, отличающиеся низким коэффициентом термического расширения, которые объединены под названием «поршневые» и включают марки КС740, АК18, ЖЛС, АК10М2Н [2]. Широкое распространение имеет сплав АК10М2Н, поскольку наличие в нем кремния позволяет формировать эвтектические колонии, что приводит к дислокационному упрочнению, наличие меди и магния упрочняет твердый раствор алюминия, а добавка никеля значительно повышает

жаропрочность [3]. Также следует отметить, что данный силумин АК10М2Н является термически упрочняемым, что позволяет значительно улучшить его механические свойства, а следовательно, и износостойкость [4].

Вместе с этим в современном материаловедении наблюдается еще одна тенденция: создание новых антифрикционных композиционных материалов путем сплавления матрицы, представляющей собой промышленный алюминиевый сплав, и тугоплавких керамических частиц, из всего многообразия которых значительная часть исследователей отдает предпочтение карбиду титана, поскольку он отличается повышенной температурой плавления, высоким модулем упругости и устойчивостью к воздействию агрессивных сред. Учеными СамГТУ ранее была показана возможность проведения СВС дисперсной фазы карбида титана как в составе чистой алюминиевой матрицы, так и на основе промышленных алюминиевых сплавов [5].

По результатам проведенного обзора целью настоящей работы было поставлено проведение СВС фазы карбида титана в количестве 10 масс. % в составе матричного промышленного сплава АК10М2Н, а также сравнение трибологических характеристик полученного композиционного материала и исходного сплава.

На рис. 1 приведены микроструктуры синтезированного композиционного материала АК10М2Н –10 % TiC до и после термической обработки. Частицы карбида титана расположены равномерно по объему матрицы и имеют правильную округлую форму с размером от 180 нм до 2 мкм, что позволяет считать керамическую фазу высокодисперсной.

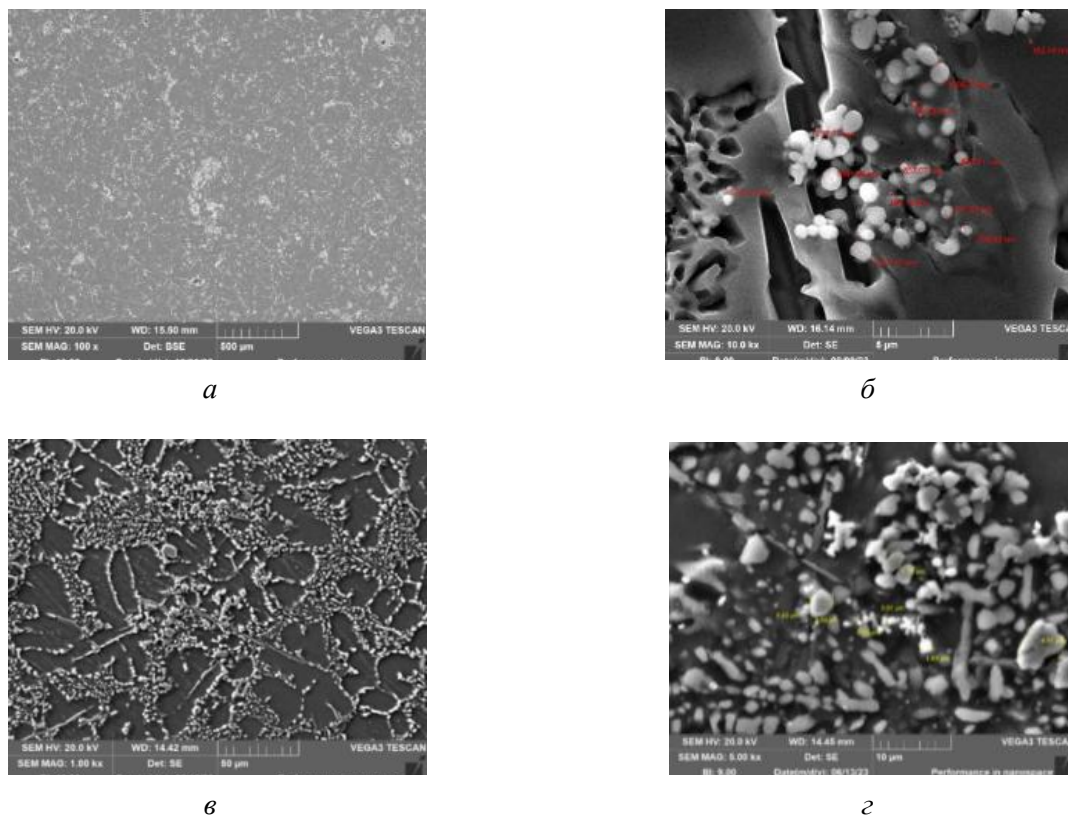
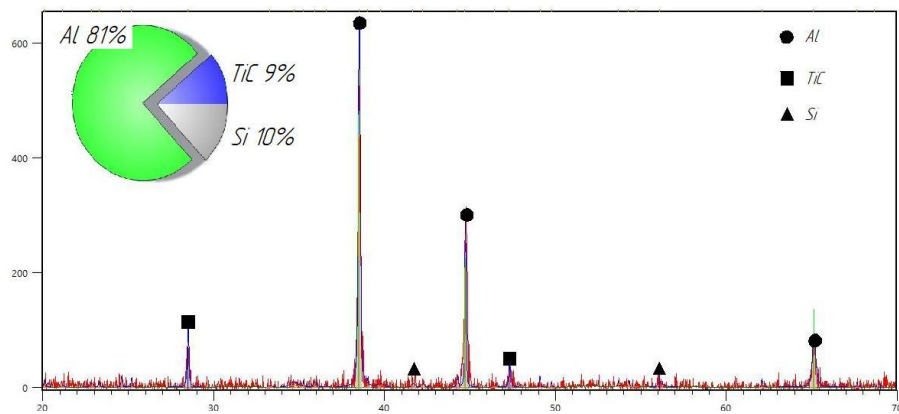
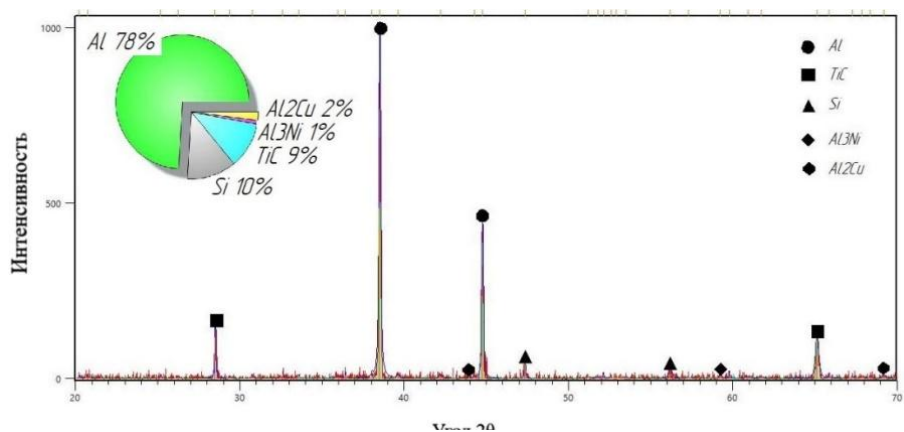


Рис. 1. Микроструктура композиционного материала АК10М2Н-10 %TiC:
а, б – до термической обработки; *в, г* – после термической обработки
 (закалка 515 °С 1 час + старение 190 °С 2 часа)

Проведенный рентгенофазовый анализ подтверждает наличие целевой фазы TiC, а его количественная обработка показывает содержание керамической фазы в количестве 9 масс. % (рис. 2, *а, б*). После проведения термической обработки на РФА фиксируются дополнительно интерметаллические фазы Al₂Cu и Al₃Ni, способствующие упрочнению (см. рис. 2, *б*).



a



б

Рис. 2. РФА композиционного материала АК10М2Н-10 % ТiС:

a – до термической обработки;

б – после термической обработки (закалка 515 °С 1 час + старение 190 °С 2 часа)

Так как сплав АК10М2Н относят к группе поршневых силуминов, важным параметром является коэффициент термического линейного расширения (КТЛР). В работе [6] упоминается, что присутствие в составе сплава такого элемента, как никель, оказывает благоприятное влияние на параметр КТЛР. На рис. 3 представлены значения коэффициента термического линейного расширения, полученные при температурах до 305 °С.

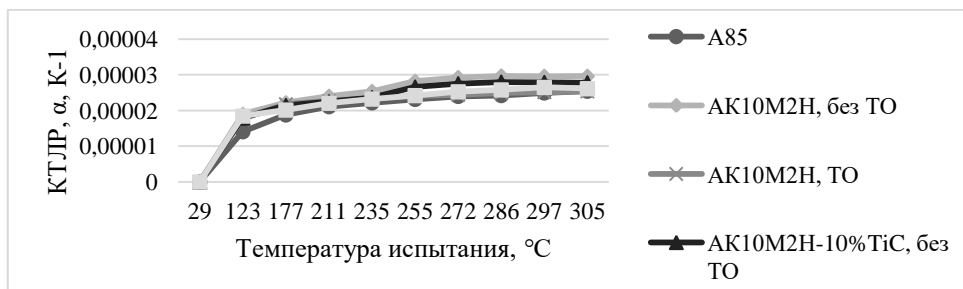


Рис. 3. Зависимость КТЛР от температуры

Испытания проводились до максимальной температуры 305 °С, при которой КТЛР материалов без ТО составил: для АК10М2Н – $29,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для композита АК10М2Н-10 % ТiС – $27,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а после ТО для АК10М2Н – $25,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для композита АК10М2Н-10 % ТiС – $26,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Полученные значения позволяют сделать вывод о сохранении уровня линейного расширения композиционного материала как до, так и после термической обработки.

Анализ триботехнических характеристик опытных образцов литейных алюминиевых сплавов был произведен в условиях эксплуатации поверхностей трения «поршень – поршневой палец» в двигателе внутреннего сгорания. Эпюры и результаты триботехнических испытаний приведены на рис. 4 и в таблице.

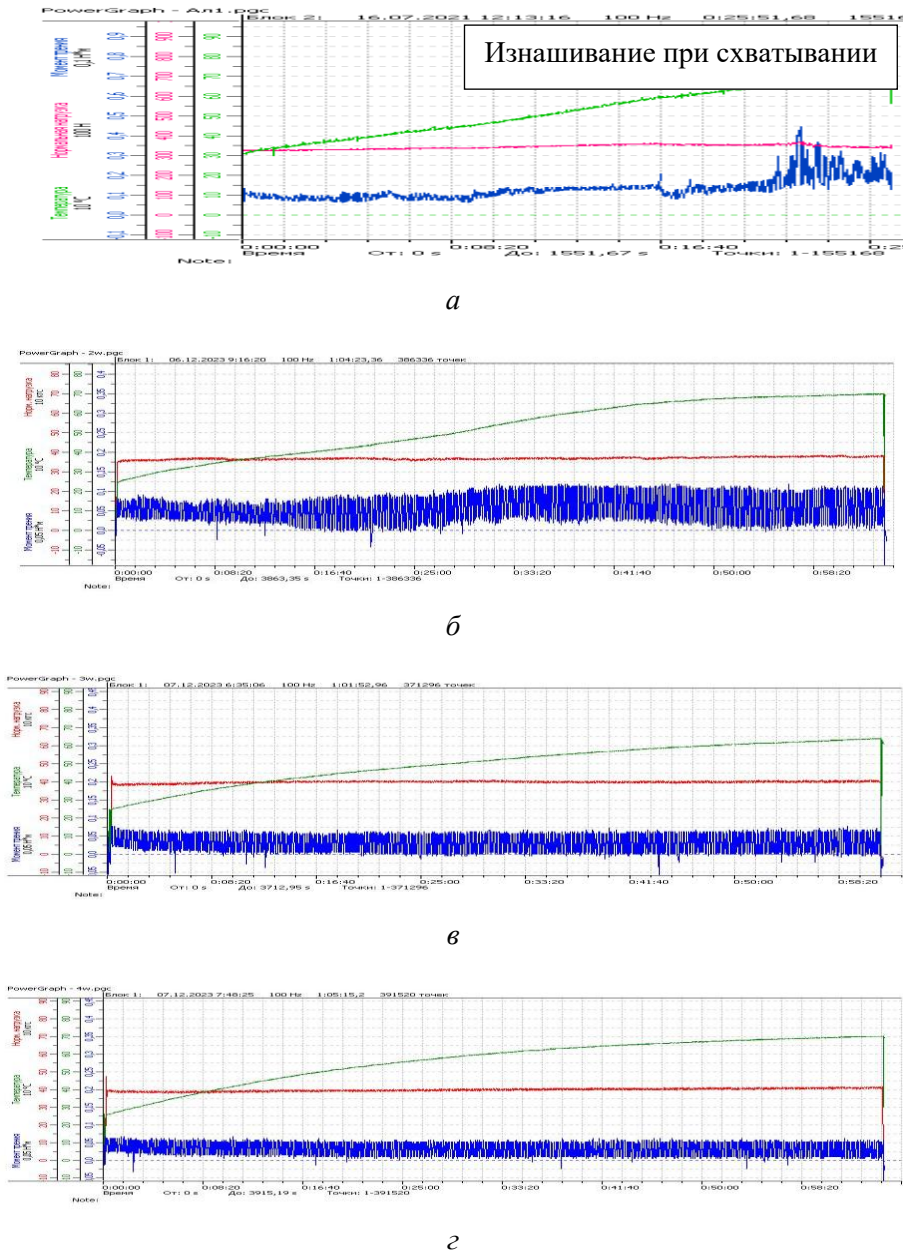


Рис. 4. Эпюры триботехнических испытаний:

а – АК10М2Н без т/о; б – АК10М2Н закалка 515 °С 2 ч. + старение 190 °С 2 ч.;
в – АК10М2Н-10 % TiC без т/о; г – АК10М2Н-10 % TiC закалка 515 °С 1 ч. + старение 190 °С 2 ч

Образец АК10М2Н показывает достаточно хорошие триботехнические свойства для использования в условиях поршней ДВС: наблюдаются отсутствие задиров на эпюре, низкий коэффициент трения и скорость изнашивания (рис. 4, а), однако следует отметить склонность образца к схватыванию при трении, что характеризуется значительным повышением коэффициента трения в конце испытания, которые являются следствием недопустимого вида изнашивания – изнашивания при схватывании. Проведение термической обработки на сплаве АК10М2Н позволяет значительно снизить скорость износа, эпюра характеризуется отсутствием задиров (рис. 4, б), однако к концу испытания коэффициент трения также возрастает. Композиционный материал АК10М2Н-10 % TiC без термической обработки показал

значительно лучшие триботехнические характеристики, чем образец АК10М2Н, достаточные для рассматриваемого узла трения (рис. 4, в). После проведения термообработки композиционный материал АК10М2Н-10 % TiC показал достаточно высокие триботехнические свойства: низкий коэффициент трения, небольшая скорость изнашивания, поверхность хорошо прирабатывается (рис. 4, з).

Механические и триботехнические характеристики

Образец	Твердость, НВ	Скорость изнашивания, мкм/час	Коэффициент трения	Температура саморазогрева, °С
АК10М2Н, без ТО	110	22,25	0,57	75
АК10М2Н, закалка 515 °С 2 ч. + старение 190 °С 2 ч	136	4,25	0,12	70
АК10М2Н-10 % TiC, без ТО	152	0,5	0,09	60
АК10М2Н-10 % TiC, закалка 515 °С 1 ч. + старение 190 °С 2 ч	173	0,25	0,03	66

Таким образом, армирование керамической фазой матричного сплава АК10М2Н в комплексе с термической обработкой позволяет сохранить низкий коэффициент термического линейного расширения, добиться повышенных значений твердости (в 1,5 раза), значительного снижения скорости износа (в 90 раз) и понижения коэффициента трения (в 19 раз). Полученный композиционный материал АК10М2Н-10 % TiC после термической обработки можно рекомендовать для изготовления деталей, работающих в узлах трения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Aluminum alloys of antifriction purpose: monogr. / N.A. Belov [et al.]; edited by A.E. Mironov, N.A. Belov, O.O. Stolyarova. M.: Ed. MISiS House. 2016. P. 222.
2. GOST 30620-98. Aluminum alloys for the production of pistons. M.: Standartinform, 1998. P. 10.
3. Development of quantitative methods for assessing the structure of pre-eutectic silumins for predicting their mechanical properties / A.A. Kazakov, D.V. Kiselev, A.A. Kur, E.B. Lazutova // Tsvetnyye metally – Non-ferrous metals. 2014. No. 4. Pp. 39–43.
4. Кенис М.С., Муратов М.С. Прогрессивные режимы термической обработки цветных сплавов: учеб. пособие. Куйбышев, 1990. 79 с.
5. Жидкофазное получение методом СВС и термическая обработка композитов на основе алюминиево-магниевого сплава, упрочненных высокодисперсной фазой карбида титана / А.Р. Луц, Ю.В. Шерина, А.П. Амосов, А.Д. Качура // Известия вузов. Цветная металлургия, 2023. Т. 59. № 4. С. 70–86.
6. Мохаммед М.А.-Л. Структура и свойства композитов на основе алюминия с низким коэффициентом термического расширения: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. М., 2018. 113 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Цифровые технологии при проектировании в машиностроении	3
<i>Аглиуллина Э.А.</i> Оптимизация цифрового проектирования трубопроводов различной конфигурации с применением методов реверс-инжиниринга.....	3
<i>Абрамова О.К.</i> Разработка 3D-модели и технологии изготовления изделия с криволинейными поверхностями.....	8
<i>Болдырева А.С.</i> Исследование физико-механических и эксплуатационных свойств детонационных покрытий при нанесении на корпус алмазного долота	11
<i>Бражникова А.М.</i> Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния в контакте ролика и внутренней дорожки качения цилиндрического роликоподшипника.....	14
<i>Воронецкий Н.М.</i> Оптимизация конструкции автономного подогревателя «Планар 4ДМ2»	17
<i>Галкин В.И., Преображенский Е.В., Маркелов Е.Е.</i> Новые направления при проектировании формы стальных поковок и износостойкой штамповой оснастки.....	21
<i>Горобец И.А., Киселица Д.О., Жарких Д.С.</i> Проектирование и моделирование параметров 3D-принтера параллельной структуры	25
<i>Горячева Д.Д., Родионов В.А.</i> Разработка 3D-модели сувенирной продукции.....	30
<i>Жернаков В.С., Дубин А.И., Конева К.В.</i> Численное моделирование остаточного напряженного состояния после дробеструйной обработки.....	33
<i>Карасев Н.И., Носов Н.В., Галлямов А.Р.</i> Исследование шероховатости поверхностей деталей из пластмасс, изготовленных при помощи FDM-печати.....	36
<i>Красикова Е.С.</i> Проектирование 3D-модели набора флаконов для духов в стиле ар-нуво	43
<i>Малкова А.О.</i> Исследование качества поверхности при получении детали методом аддитивных технологий.....	48
<i>Низамов Д.А.</i> Примеры топологической оптимизации в авиастроении	52
<i>Никитин К.А.</i> Проектирование гидромагистралей на самолете	56
<i>Парфёнов К.В., Ибатуллин И.Д.</i> Разработка энергетической модели процесса коррозии.....	59
<i>Покровский А.В.</i> Изготовление оснастки для разрывной машины с применением технологии реверс-инжиниринга в рамках импортозамещения	63
<i>Проценко М.С., Кутин А.А.</i> Разработка моделей формирования цифрового двойника деталей типа тел вращения и их технологическое описание	67
<i>Сёмин А.С.</i> Методы параметризации 3D-моделей с использованием API КОМПАС-3D.....	72
<i>Строкач Е.А., Пожидаев А.А.</i> Моделирование дробеударного формообразования: краткий обзор современных работ.....	75
<i>Суханов Д.С.</i> Исследование характеристик узла теплообмена автомобильных подогревателей с помощью 3D-моделирования.....	79
<i>Тен А.Ю., Родионов В.А.</i> Моделирование «декоративной полки» в системе автоматизированного проектирования.....	82
Секция 2. Инновационные технологии в науке и образовании	85
<i>Болдырев А.А., Болдырев А.И., Григораши В.В.</i> Повышение усталостной прочности и коррозионной стойкости деталей машин путем формирования микроповерхности сплавов при электрохимической обработке	85
<i>Болдырев А.А., Болдырев А.И., Падурец А.А.</i> Экспериментальные исследования технологических показателей процесса электрохимической обработки деталей машин из ниобиевых сплавов	89
<i>Гаспарова Л.Б.</i> Компьютерная составляющая при подготовке студентов машиностроительного профиля	93
<i>Олешко В.С.</i> Алгоритм определения поверхностной энергии металлических деталей машин методом контактной разности потенциалов	96
<i>Павлов В.Ф., Морозов А.Ю., Денискина Е.А., Михалкина С.А., Труфакин А.Э.</i> Оценка влияния глубины надреза на предел выносливости поверхностно упрочненных образцов	99

<i>Титов В.А., Гречухин А.В., Ахмедов Н.А., Шаговская В.С.</i> Применение сверхтвердых материалов для поверхностной обработки твердых сплавов.....	103
<i>Унянин А.Н., Димухаметов И.З.</i> Влияние шага зубьев фрезы и элементов режима на технологические параметры обработки заготовок из поликарбоната с применением ультразвуковых колебаний.....	106
<i>Унянин А.Н., Чуднов А.В.</i> Влияние свойств внешней среды на температурное поле процесса фрезерования.....	111
<i>Федотов Д.Д., Ярьсько С.И.</i> Применение лазерной ударной обработки для упрочнения конструкционных сталей.....	115
<i>Хакимзянова С.И., Никишина Г.В.</i> Применение технологий Интернета вещей для реализации виртуальных лабораторий.....	120
<i>Хохлова О.А., Пономарёва Е.В., Синельщиков А.В.</i> О применении электронной проблемно-ориентированной обучающей системы в области механики.....	125
<i>Шварц И.В., Крылов Я.В., Никифоров С.А., Горунев А.Н., Гильмутдинов А.Х.</i> Лазерно-акустический точечный способ обработки поверхности нержавеющей стали и ее последующий анализ.....	131
<i>Шеховцева Е.В.</i> Исследование структуры процесса усталостных разрушений зубчатых колес.....	136
<i>Ярьсько С.И., Балакиров С.Н.</i> Градиент температуры при импульсной лазерной термообработке гетерофазных твердых сплавов.....	141

Секция 3. Проектирование, эксплуатация и метрологическое обеспечение инструментальных систем и оборудования современных машиностроительных производств.....

<i>Брунгардт А.В., Брунгардт М.В., Шатохин С.Н.</i> Проектирование главного привода многоцелевых станков с частотным управлением и опорами качения шпинделя.....	145
<i>Гуарна М.Д., Денисенко А.Ф., Ладыгин Р.В., Якимов М.В.</i> Определение рационального размера выборки нейросети для прогнозирования эксплуатационных характеристик шпиндельного узла.....	151
<i>Денисенко А.Ф., Гришин Р.Г., Антипова Е.Д.</i> Расчет геометрической точности обрабатываемой поверхности в зависимости от параметров хонингования.....	156
<i>Епифанцев К.В., Петров Г.А., Егоров А.Э.</i> Разработка триплексного датчика для кругломеров.....	160
<i>Ибатуллин И.Д., Колибасов В.А.</i> Устройство для испытания резцов PDC на абразивное изнашивание.....	163
<i>Китаев А.А., Андрюхина Т.Н.</i> Метод контроля геометрических параметров уплотнительных поверхностей с использованием лазерного трекера.....	167
<i>Малкина И.В., Кляшторная Н.Л.</i> Метрологическое обеспечение процесса контроля расхода газа.....	171
<i>Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С.</i> Синтез функционально-ориентированного технологического обеспечения для поверхностно-пластического упрочнения лопаток ГТД.....	175
<i>Мосур В.Г., Шарков О.В.</i> Влияние фактора формы на демпфирующие характеристики амортизирующих элементов из полиуретана.....	180
<i>Полтавец В.В., Шаповалова Н.Н.</i> Определение предельного значения радиальной составляющей силы резания при шлифовании титанового сплава BT14 по температуре полиморфного превращения.....	184
<i>Трофименко Н.Г.</i> Исследование стойкости инструмента со сменными многогранными пластинами на токарных операциях.....	189

Секция 4. Материаловедение и металлургия в современном машиностроении.....

<i>Андряшкин Д.В., Майдан Д.А.</i> Термодинамический анализ возможности получения высокодисперсной керамической композиции AlN-TiC методом азидного СВС с использованием меланина в качестве источника углерода.....	192
<i>Берков Д.В., Верёвкин А.Г.</i> Оценка стойкости внутренних защитных покрытий насосно-компрессорных труб к неорганическим солеотложениям.....	197
<i>Бедретдинов И.Р.</i> Пути повышения качества сварных швов в судостроительном производстве.....	202

<i>Валяева М.Е., Кондратьева Л.А.</i> Химическая стабильность получения силалона по азидной технологии СВС из системы $2\text{SiO}_2+15\text{NaN}_3+3\text{AlF}_3+(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$	206
<i>Васильев И.С., Мозжерин В.В., Терентьев А.А., Нагулин К.Ю., Гильмутдинов А.Х.</i> Исследование влияния процесса плазменной сфероидизации на технологические свойства порошка INCONEL 718	211
<i>Головкин П.А.</i> О некоторых причинах расслоений в лентах из сплава 42НХТЮ	216
<i>Гудиминко З.А., Титова Ю.В., Уварова И.А.</i> Получение высокодисперсной керамической композиции AlN-SiC методом азидного СВС.....	222
<i>Гусев В.Д., Баранов Д.А., Щедрин Е.Ю., Гусев О.Н., Жаткин С.С.</i> Рециклинг металлопорошковых композиций в технологическом процессе прямого лазерного выращивания заготовок для промышленных двигателей	225
<i>Давыдов Д.М., Закамов Д.В.</i> Термодинамический анализ процесса получения МАХ-фаз Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_2	231
<i>Дубиню Ю.С., Танасенко М.С.</i> Создание оксидной пленки с помощью фосфатирования как метод борьбы с коррозией.....	234
<i>Егоров Н.Т., Крымов В.Н.</i> Особенности образования аустенита в толстолистовых низколегированных сталях при термической обработке с использованием тепла прокатного нагрева	238
<i>Каракич Е.А., Амосов А.П., Латухин Е.И., Умеров Э.Р.</i> Разработка технологии получения металлокерамического композита TiC-Cu путем применения металлотермического процесса для инфильтрации расплавом металла керамического СВС-каркаса	242
<i>Качура А.Д., Луц А.Р., Шерина Ю.В.</i> Исследование физико-механических свойств композиционных материалов на основе сплава AMg2, армированных фазой карбида титана	247
<i>Кузьменко Е.Д.</i> Исследование физико-механических свойств инструментальной керамики на основе карбонитрида циркония, полученной методом горячего прессования.....	251
<i>Леушин И.О., Герасимов А.В., Любомиров Д.А.</i> Применение аддитивных песчаных стержней на примере изготовления отливки «Аппарат направляющий» из коррозионностойких сталей.....	254
<i>Малаева П.В.</i> Изготовление деталей в авиастроении из армированного цельнотканого композита.....	261
<i>Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С.</i> Исследование причин возникновения дефектов и пониженных свойств при термической обработке деталей авиационной техники из стали 30X13	265
<i>Наурзалинова Л.К., Горунов А.И., Романова А.М.</i> Исследование влияния мощности лазерного излучения при печати методом прямого лазерного нанесения металла на формирование структуры стали 316L.....	269
<i>Негодяев В.О., Жаткин С.С., Никитин К.В.</i> Особенности формирования структуры жаропрочного хромоникелевого сплава, получаемого лазерной наплавкой из металлопорошковой композиции марки ЭП648	272
<i>Некрасов В.И., Латухин Е.И., Кондратьева Л.А.</i> Получение пористой керамики из системы Ti-C-Cu в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза	277
<i>Орлова М.С., Горунов А.И.</i> Влияние термической обработки на электропроводность медных покрытий, полученных методом холодного напыления с интенсификацией лазером.....	281
<i>Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р.</i> Развитие применения металлических порошков для ММ-технологии	285
<i>Плеханов А.М., Майдан Д.А.</i> Термодинамический анализ возможности получения высокодисперсной керамической композиции Si_3N_4 -TiC методом азидного СВС с использованием меламина в качестве источника углерода.....	290
<i>Пугачева Т.М., Котельников Д.В.</i> Анализ характера и причин дефектов компенсационного кольца из стали ШХ15	295
<i>Пугачева Т.М., Котельников Д.В.</i> Трансформация микроструктуры и твердости деталей подшипника из стали ШХ15-Ш вследствие аномального разогрева при эксплуатации.....	299
<i>Романова А.М., Горунов А.И., Наурзалинова Л.К.</i> Перспективы использования тантала в качестве легирующего элемента для стали 316L.....	304
<i>Шерина Ю.В., Луц А.Р.</i> Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана, синтезированной в расплаве, и термообработки на триботехнические свойства сплава АК10М2Н	307

Научное издание

Отв. ред. ГАЛЛЯМОВ Альберт Рафисович

**Высокие технологии в машиностроении:
материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции
с международным участием**

Редактор Е.С. Захарова

Компьютерная верстка М.В. Марченко

Выпускающий редактор Ю.А. Петропольская

Подписано в печать 20.06.24

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная

Усл. п. л. 18,32. Уч.-изд. л. 18,28

Тираж 40 экз. Рег. № 58/24

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8