

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

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

9–11 апреля 2025 г.

**Самара
Самарский государственный технический университет
2025**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Материалы XXII Всероссийской
научно-технической конференции
с международным участием

9–11 апреля 2025 г.

Самара
Самарский государственный технический университет
2025

Печатается по решению методического совета факультета машиностроения, металлургии и транспорта СамГТУ (протокол № 7 от 24.02.2025 г.).

УДК 621(06)

ББК 34.4я4

В 932

Высокие технологии в машиностроении: материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 9–11 апреля 2025 г. / Отв. ред. *А.Р. Галлямов*. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2025. – 251 с.

ISBN 978-5-7964-2488-9

Сборник содержит тезисы докладов участников XXII Всероссийской научно-технической конференции 2025 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,

зав. каф. «Технология твердых химических веществ» *Д.А. Деморецкий*,

канд. техн. наук, ст. научный сотрудник лаборатории «Инженерия поверхности» СамНЦ РАН *Д.В. Назаров*

УДК 621(06)

ББК 34.4я4

В 932

ISBN 978-5-7964-2488-9

© Авторы, 2025

© Самарский государственный
технический университет, 2025

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

621.9.047

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ
СВЯЗКИ М 1 ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ АЛМАЗНЫХ
ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

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*

Приведены результаты исследования кинетики анодного растворения металлической связки М 1, широко используемой для изготовления алмазных шлифовальных кругов, а также результаты исследования по подбору электролита для профилирования алмазных кругов электрохимическим методом. Исследования выполнялись путем снятия потенциокинетических кривых на вращающемся дисковом электроде. Показано, что с точки зрения обеспечения наиболее высокой скорости анодного растворения связки при наименьшей величине шероховатости целесообразно обработку проводить в растворе бромистого калия при невысокой скорости его прокачивания.

Ключевые слова: алмазные шлифовальные круги, металлическая связка, анодное растворение

**EXPERIMENTAL STUDY OF M 1 BOND ANODIC BEHAVIOR
IN PROFILING DIAMOND GRINDING WHEELS**

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*

This article presents the results of studying the kinetics of M 1 metal bond anodic dissolution, widely used for the manufacture of diamond grinding wheels, as well as the results of research on the selection of an electrolyte for profiling diamond wheels by the electrochemical method. The studies were carried out by recording potential kinetic curves on a rotating disk electrode. It is shown that, from the point of view of ensuring the highest rate of anodic dissolution of the bond with the lowest roughness, it is advisable to carry out the treatment in a solution of potassium bromide at a low pumping speed.

Keywords: diamond grinding wheels, metal bond, anodic dissolution

Отсутствие сведений о закономерностях процесса анодного растворения связок профилированных алмазных шлифовальных кругов и рекомендаций относительно выбора состава электролита сдерживает развитие электрохимического метода профилирования алмазных кругов на металлических связках. В настоящей работе приведены результаты исследования кинетики анодного растворения связки М 1, которая весьма широко применяется при изготовлении алмазных шлифовальных кругов. Эта связка состоит из 80 % Cu и 20 % Sn и получают ее методом порошковой металлургии.

Исследования проводились путем снятия потенциокINETических кривых на вращающемся дисковом электроде по методике, приведенной в работе [1]. Исследуемые образцы в виде стержней диаметром 4 мм получали по существующей технологии изготовления алмазных кругов. Электролиты подготавливались из реактивов марок ЧДА и ХЧ на дистиллированной воде. Поляризационные кривые снимались на потенциостате Р-40Х при скорости изменения потенциала 80 мкВ/с.

Пассивация обрабатываемого металла может облегчаться при накоплении в приэлектродном слое продуктов растворения [2]. Это отчетливо видно из рисунка, *а*, на котором приведены поляризационные кривые, снятые в растворе азотнокислого натрия при различных скоростях вращения исследуемого электрода. Когда процесс протекает на неподвижном электроде в 5 н. растворе, скорость растворения ограничивается бурно выделяющимся газообразным кислородом (кривая 1). При перемешивании электролита происходит интенсивный отвод пузырьков кислорода, что способствует достижению более высоких плотностей тока (кривая 2). В электролите невысокой концентрации (0,5 н.) количество выделяющегося кислорода незначительно, и кривые, снятые на неподвижном и вращающемся электродах, практически совпадают (кривая 3).

Растворение связки в растворе хлористого натрия протекает со значительными затруднениями, что можно объяснить образованием на поверхности анода фазовой окисной пленки [3]. На неподвижном электроде в данном электролите процесс растворения практически не протекает (рисунок, *б*, кривая 1). Интенсивное перемешивание электролита и повышение температуры (кривые 2, 3) приводят к частичному разрушению пленки и снижению пассивационных ограничений. Наличие фазовой окисной пленки подтверждается также тем, что плотность тока увеличивается при добавлении к электролиту небольшого количества ($3 \cdot 10^{-2}$ г-ион/л) ионов NO_3 , обладающих активирующим действием на данную связку (кривая 4).

Наибольшая скорость анодного растворения связки М 1 наблюдается в растворе бромистого калия. Процесс растворения в этом электролите характеризуется наличием диффузионных ограничений, как и в случае с NaNO_3 . Скорость анодного растворения на неподвижном электроде невелика (рисунок, *в*, кривая 1) вследствие возникновения концентрированной поляризации. Перемешивание электролита снижает поляризацию анода и позволяет достигать высоких плотностей тока (кривая 2).

Применимость того или иного электролита для профилирования алмазных кругов определяется не только скоростью процесса растворения связки в целом, но и равномерностью растворения ее отдельных компонентов. Следует отметить, что состояние поверхности связки алмазных кругов оказывает существенное влияние на их работоспособность. Равномерность растворения связки определялась путем измерения шероховатости поверхности при обработке образцов в различных электролитах и при различных условиях процесса растворения.

Наибольшая шероховатость поверхности образца ($R_z = 40$ мкм) наблюдается при обработке в растворе NaNO_3 .

Судя по профилограмме, большие неровности в данном случае образуются в виде питтингов, а не за счет структурной неравномерности, поскольку шаг неровностей значительно превышает шаг фазовых элементов связки.

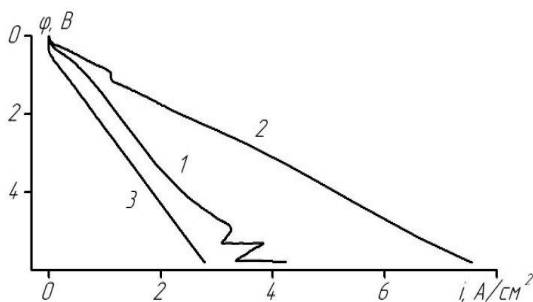
При обработке образцов в растворе NaCl наличие фазовой окисной пленки приводит к более равномерному растворению как отдельных компонентов, так и поверхности в целом ($R_z = 15$ мкм). Минимальная шероховатость наблюдается при обработке в растворе KBr . При небольшой скорости перемешивания электролита (500 мин^{-1}) величина R_z не превышает 10 мкм.

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы:

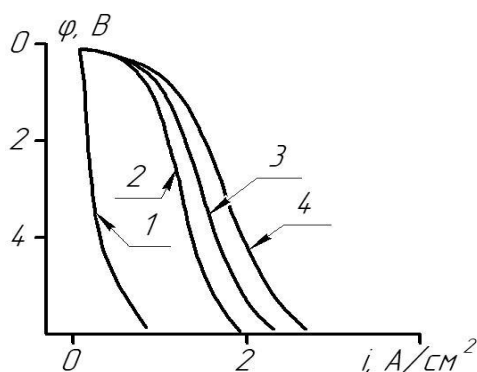
1. На процесс анодного растворения связки М 1 существенное влияние оказывает анионный состав электролита и скорость его перемешивания.

2. Наибольшая скорость анодного растворения связки М 1 достигается в растворе бромистого калия.

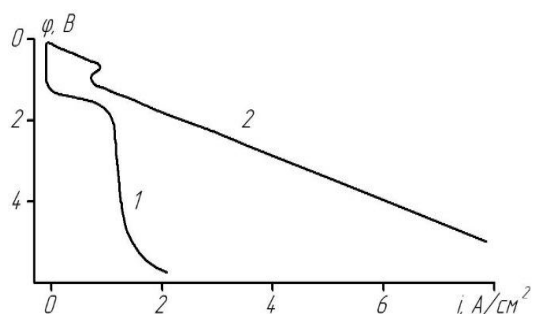
3. Для получения поверхности с наименьшей величиной шероховатости обработку целесообразно проводить в растворе бромистого калия при невысокой скорости его прокачивания.



а



б



в

Потенциокинетические поляризационные кривые, снятые на аноде из связки М 1 в растворах:

а – NaNO_3 концентрации 5 н.; б – NaCl концентрации 6 н.;

в – KBr концентрации 5 н.;

1 – скорость вращения электрода $n = 0 \text{ мин}^{-1}$;

2 – скорость вращения электрода $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$;

3 – концентрация 0,5 н.; 4 – с добавкой ионов NO_3

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Феттер, К. Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – М.: Химия, 1967. – 856 с.
2. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов. – Братск: Братский гос. ун-т, 2009. – 228 с.
3. Янюшкин, А.С. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов // Вестн. Вост. Сибир. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 1. – С. 178–183.

ЗАВИСИМОСТЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ ТОКА, ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ШЛИФОВАНИИ СТАЛИ 12Х18Н10Т

Борисов М.А.¹, доцент, к.т.н., доцент, **Надеждина О.А.**¹, старший преподаватель, **Зворыгин А.С.**², начальник группы

¹ Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Российская Федерация

² Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), г. Саров, Российская Федерация
E-mail: borisovmgou@mail.ru

Одним из способов финишной обработки деталей, изготовленных из нержавеющей сталей, является электрохимическое шлифование инструментом из сверхтвердых материалов на металлической связке. Цель работы состоит в определении зависимости шероховатости обрабатываемой поверхности от плотности тока, температуры и концентрации электролита при электрохимическом шлифовании стали 12Х18Н10Т. Полученное в результате обработки экспериментальных данных уравнение регрессии отражает зависимость шероховатости поверхности от плотности тока, температуры электролита и концентрации NaCl в электролите.

Ключевые слова: электрохимическое шлифование, инструмент из сверхтвердых материалов, электролит, плотность тока, шероховатость поверхности

DEPENDENCE OF SURFACE ROUGHNESS ON CURRENT DENSITY, TEMPERATURE AND ELECTROLYTE CONCENTRATION DURING ELECTROCHEMICAL GRINDING OF STEEL 12X18H10T

Borisov M.A.¹, Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Nadezhkina O.A.**¹, senior lecturer, **Zvorygin A.S.**², Group Chief

¹ Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation

² Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (FSUE “RFNC-VNIIEF”), Sarov, Russian Federation
E-mail: borisovmgou@mail.ru

One of the methods for finishing parts made of stainless steel is electrochemical grinding with a tool made of superhard materials with a metal bond. The purpose of the work is to determine the dependence of the roughness of the machined surface on the current density, temperature and electrolyte concentration during electrochemical grinding of 12X18H10T steel. The regression equation obtained as a result of processing experimental data reflects the dependence of surface roughness on current density, electrolyte temperature and NaCl concentration in the electrolyte.

Keywords: electrochemical grinding, tools made of superhard materials, electrolyte, current density, surface roughness

Одним из способов финишной обработки деталей, изготовленных из нержавеющей сталей, является электрохимическое шлифование инструментом из сверхтвердых материалов (алмаза и эльбора) на металлической связке. Указанный способ комбинированной обработки позволяет снизить шероховатость обрабатываемой поверхности и повысить производительность обработки [1–5]. На шероховатость поверхности оказывают влияние характеристики электрического тока и используемого электролита.

Цель работы состоит в определении зависимости шероховатости обрабатываемой поверхности от плотности тока, температуры и концентрации электролита при электрохимическом шлифовании стали 12Х18Н10Т.

При проведении экспериментов использовался специальный лабораторный стенд, методика проведения экспериментов и профилометр модели 130 [6]. Стенд позволяет реализовать процесс электрохимического шлифования стальных образцов инструментом из сверхтвердых материалов на металлической связке, изменять характеристики электрического тока и температуру электролита. Применялся электролит, состоящий из раствора NaCl в воде. При проведении экспериментов изменялась температура электролита и концентрация NaCl в электролите, а также плотность тока. Для обработки образцов использовалась алмазная головка на металлической связке диаметром 3 мм. Планирование и обработка результатов экспериментов проводились с использованием стандартной методики подготовки и проведения полного факторного эксперимента. Исходные данные для планирования и обработки результатов экспериментов представлены в таблице.

Исходные данные для планирования и обработка результатов экспериментов

| Факторы | Уровни | | | Интервал варьирования |
|--|-----------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| | Верхний $X_i = +1$ | Основной (Нулевой) $X_i = 0$ | Нижний $X_i = -1$ | |
| X_1 – температура электролита, °С | 50 | 35 | 20 | 15 |
| X_2 – плотность тока, А/мм ² | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| X_3 – концентрация NaCl в электролите, % | 20 | 10,45 | 0,9 | 9,55 |

Полученное в результате обработки экспериментальных данных уравнение регрессии отражает зависимость шероховатости поверхности от плотности тока, температуры электролита и концентрации NaCl в электролите и имеет следующий вид:

$$R_a = 0,6634 - 0,0565_z - 7,7071_v - 0,0872_c + 0,3728_{zv} + 0,0054_{zc} + 0,7375_{vc} - 0,0357_{zvc} \quad (1)$$

где z – температура электролита, °С;

v – плотность тока, А/мм²; c – концентрация NaCl в электролите, %.

Частные случаи поверхностей отклика системы при постоянных значениях режимов резания в нулевом уровне варьирования приведены на рис. 1–3.

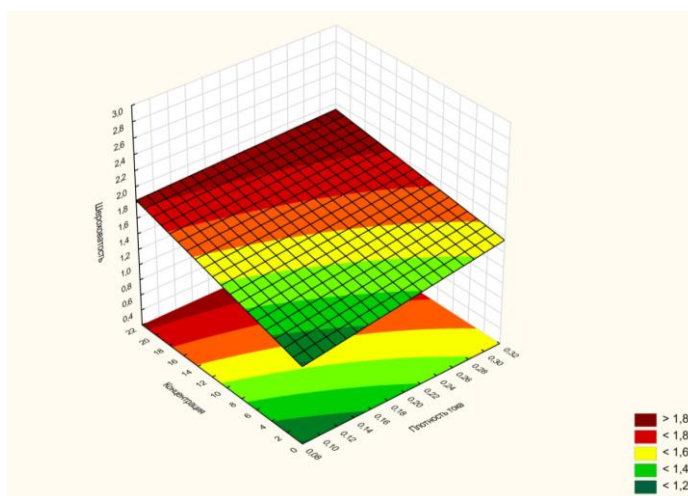


Рис. 1. Графики влияния плотности тока и концентрации NaCl в электролите на шероховатость R_a обработанной поверхности стали 12Х18Н10Т при $z = 35^\circ$

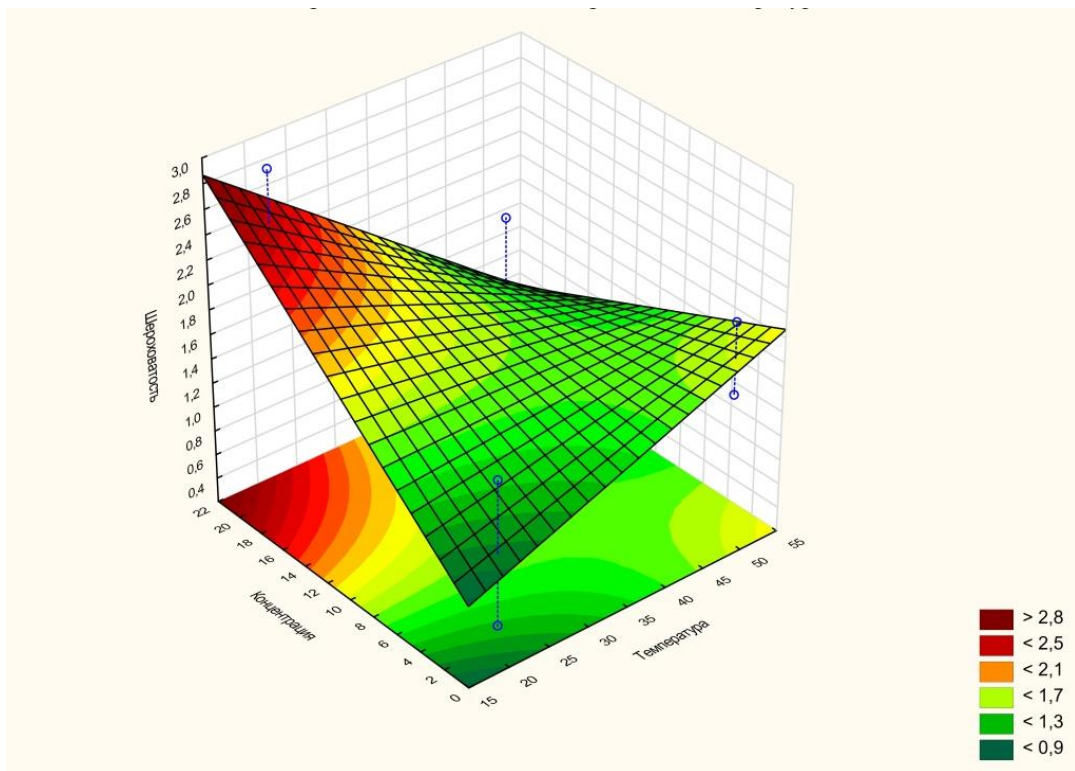


Рис. 2. Графики влияния температуры электролита и концентрации NaCl в электролите на шероховатость Ra обработанной поверхности стали 12X18H10T при $\nu = 0,2 \text{ А/мм}^2$

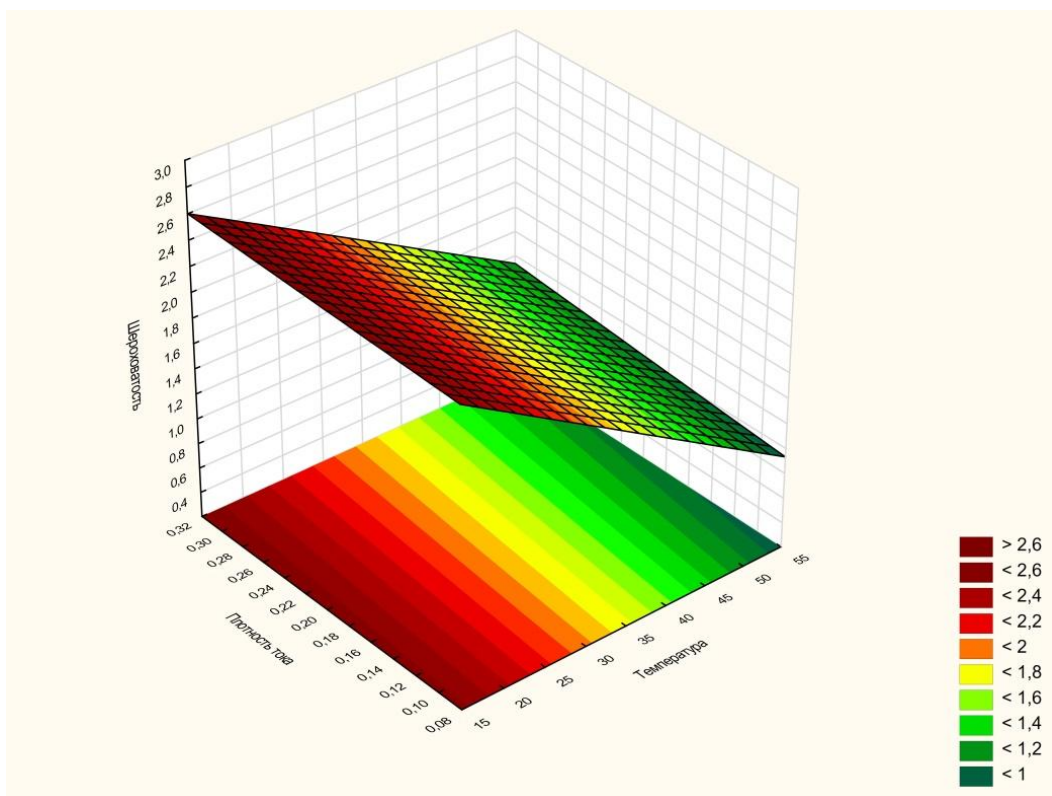


Рис. 3. Графики влияния температуры электролита и плотности тока на шероховатость Ra обработанной поверхности стали 12X18H10T при $c = 10,45 \%$

Полученное уравнение регрессии и поверхности отклика позволяют прогнозировать влияние плотности тока, температуры электролита и концентрации NaCl в электролите на шероховатость обрабатываемой поверхности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Борисов, М.А. Гибридная технология электрохимической обработки сложнопрофильных изделий / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 25–34. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-25-34.
2. Янюшкин, А.С. Исследование влияния электрических режимов комбинированной электроалмазной обработки на качество шлифования твердых сплавов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Томск: Юргинский технологический институт, 2014. – С. 323–327.
3. Носенко, В.А. Физико-химические методы обработки материалов: учеб. пособие / В.А. Носенко, М.В. Даниленко. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 196 с.
4. Борисов, М.А. Влияние режимов резания на шероховатость поверхности при электрохимическом шлифовании коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т / М.А. Борисов, В.В. Николаев // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2021. – Т. 8, № 3–4. – С. 19–24. – EDN USFTZH.
5. Применение металлоорганической связки при шлифовании кругами с зёрнами из сверхтвёрдых материалов / П.М. Салов, Д.П. Салова, С.С. Сайкин, Н.И. Мулюхин, М.А. Борисов, О.А. Надеждина // Инновационные технологии в металлообработке: сборник научных трудов, Ульяновск, 12 ноября 2016 года / Отв. ред. Н.И. Веткасов. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. – С. 114–118. – EDN ХҮНКDH.
6. Борисов, М.А. Влияние температуры и концентрации электролита на шероховатость при электрохимическом шлифовании коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т / М.А. Борисов, А.С. Зворыгин // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2022. – Т. 9, № 1–2. – С. 15–22. – EDN DGLOIP.

ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ ИНВЕРТОРНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО МОДУЛЯ С ОПОРАМИ КАЧЕНИЯ

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

Рассмотрена методика проектного расчёта параметрической виброустойчивости прямого и ременного инверторного главного привода многоцелевых станков с ЧПУ (обрабатывающих центров) с асинхронным или синхронным электродвигателем и опорами качения шпинделя, аналитические условия и диаграмма виброустойчивости, позволяющие определить диапазоны дорезонансных и зарезонансных крутильных и радиальных вибраций шпинделя. Даны рекомендации рационального использования этих диапазонов при размерной обработке. Рассмотрены особенности дробления (автоколебаний), которые возникают в безрезонансных диапазонах шпинделя при скоростном фрезеровании алюминия.

Ключевые слова: станки с ЧПУ, инверторный главный привод, шпиндель с опорами качения, безрезонансное фрезерование

VIBRATION RESISTANCE OF INVERTER SPINDLE MODULE WITH ROLLING MOUNTS BEARINGS

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

The method of design calculation of parametric vibration resistance of direct and belt inverter main drive of multi-purpose CNC machines (machining centers) with an induction or synchronous electric motor and spindle rolling supports is considered. analytical conditions and vibration resistance diagram to determine the ranges of pre-resonance and post-resonance torsional and radial spindle vibrations. Recommendations for the rational use of these ranges in dimensional processing are given. The features of crushing (self-oscillations) that occur in the non-resonant ranges of the spindle during high-speed milling of aluminum are considered.

Keywords: CNC machines, inverter main drive, spindle with rolling supports, resonance-free milling

Актуальность темы. Определение виброустойчивости вынужденных вибраций шпинделей с опорами качения особенно актуально для инверторного главного привода многоцелевых станков с ЧПУ (обрабатывающих центров), которые работают в широком диапазоне используемых инструментов, материалов, размеров и форм обрабатываемых заготовок при частоте вращения 10000 мин^{-1} и более [1, 2, 3].

Известные методики теоретического определения динамических характеристик шпинделей станков с опорами качения [4, с. 357–376], [5, с. 181–184], [7, с. 176–178] и др. не дают практических рекомендаций для определения безрезонансной частоты вынужденных вибраций шпинделя, возникающих при размерной обработке резанием, а также не рассматривают безрезонансные крутильные вибрации ременного привода с асинхронным электродвигателем.

Определение виброустойчивости. Ниже приведены аналитические условия и диаграмма виброустойчивости (см. рисунок), которые позволяют определить диапазоны безрезонансных радиальных и крутильных вибраций прямого инверторного главного привода с асинхронным или синхронным вентильным электродвигателем и опорами качения шпинделя

для многоцелевого станка с ЧПУ при номинальной мощности электродвигателя $N_H = 12 \cdot 10^3$ Н·м/с; диаметре шпинделя в передней опоре $d_{ш} = 0,065$ м; радиальной жесткости на переднем конце шпинделя $j_{ш} = 1,24 \cdot 10^8$ Н/м; крутильной жесткости асинхронного электродвигателя $\varphi_s = s_3 N_H / f_H \approx 235$ Н·м/рад; расчётной массе шпинделя $m_p = 7,4$ кг \equiv Н·с²/м, приведенной к его переднему концу с учётом инструментальной оснастки; центробежном моменте инерции массы шпинделя $J_{ш} = 5,8 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с²/рад.

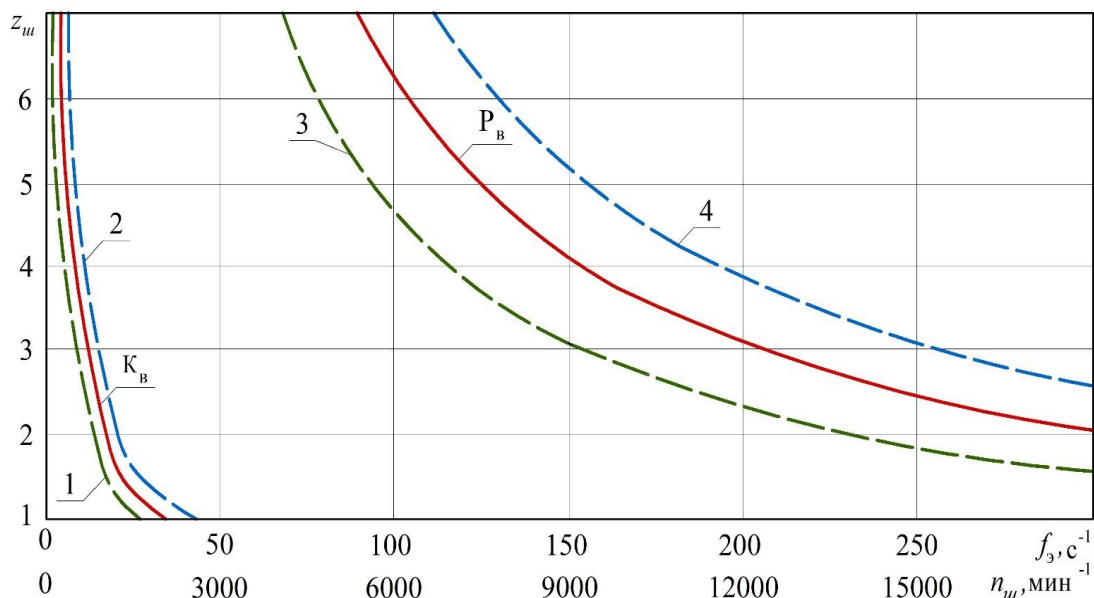


Диаграмма виброустойчивости прямого главного привода многоцелевого станка с инверторным асинхронным электродвигателем и опорами качения шпинделя

Ось абсцисс диаграммы показывает изменение инверторной частоты трёхфазного переменного тока f_3, c^{-1} и соответствующую ей частоту инверторного трёхфазного тока асинхронного электродвигателя. Ось ординат диаграммы показывает число $z_{ш}$ вынужденных вибраций за один оборот шпинделя (при точении вращающейся некруглой заготовки $z_{ш}$ равно числу некруглостей, при фрезеровании $z_{ш}$ равно числу зубьев фрезы).

Сплошной график K_B соответствует условию резонанса вынужденных и собственных крутильных вибраций шпинделя $z_{ш} f_3 = \sqrt{N_H s_3 k_{ш} / J_{ш} f_H} / (2\pi)$, – при $f_3 < 50 c^{-1}$ и $z_{ш} f_3 = \sqrt{N_H s_3 k_{ш} / J_{ш} f_3} / (2\pi)$ – при $f_3 > 50 c^{-1}$, где $f_H = 50 c^{-1}$ – номинальная частота общепромышленного переменного тока; $s_3 = 0,98$ – относительное скольжение ротора асинхронного электродвигателя; $k_{ш} \approx 0,9$ – коэффициент демпфирования шпинделя с радиально-упорными шариковыми подшипниками качения в опорах.

Видно, что резонанс крутильных вибраций соответствует низким частотам вращения шпинделя, которые необходимы только при черновом точении труднообрабатываемых материалов, а также при сверлении и развёртывании отверстий или нарезании в них резьбы.

Сплошной график P_B диаграммы соответствует условию резонанса частоты вынужденных и собственных радиальных вибраций шпинделя $z_{ш} f_3 = \sqrt{j_{ш} k_{ш} / m_p} / (2\pi)$.

Для обеспечения безрезонансной работы шпинделя главного привода необходимо, чтобы при конкретном значении $z_{ш}$ частота тока электродвигателя f_3 имела запас 25 % в меньшую и большую сторону от резонансной частоты крутильных и радиальных вибраций. С учётом этого запаса получим:

1) диапазон дорезонансных крутильных вибраций шпинделя, расположенный ниже штрихового графика 1, рекомендуется использовать для чернового точения труднообрабатываемых материалов, сверления, зенкерования и развёртывания отверстий, а также нарезания в них резьбы;

2) диапазон зарезонансных крутильных и дорезонансных радиальных вибраций шпинделя, расположенный между штриховыми графиками 2 и 3, рекомендуется использовать для черновой и чистовой размерной обработки резанием обычных конструкционных материалов;

3) диапазон зарезонансных радиальных вибраций шпинделя, расположенный выше штрихового графика 4, допускается использовать для высокоскоростного фрезерования легкообрабатываемых материалов, в том числе алюминия.

Влияние заготовки, инструмента и режима резания. Влияние технологической оснастки шпинделя (патрон с заготовкой для токарных станков или оправки с инструментом для фрезерных и расточных станков) может уменьшить реальную радиальную жесткость главного привода в зоне резания на 60–70 % и более [5, с 228], а также существенно увеличить расчётную массу, что на 20–30 % снижает частоту резонанса радиальных вибраций. Кроме того, большинство параметров главного привода многоцелевых станков с ЧПУ остается практически неизменным, тогда как параметры инструментальной оснастки (податливость, вылет, масса, материал режущей части, геометрия режущего лезвия, форма каналов отвода стружки, глубина и подача резания), а также параметры обрабатываемой заготовки (материал, жесткость формы, равномерность припуска), а также дисбаланс вращающихся заготовок постоянно изменяются. Поэтому предприятия с большим числом одинаковых станков с ЧПУ нередко получают неприятности именно потому, что полагают, будто от одинаковых станков с одинаковыми шпинделями можно ожидать одинаковой или достаточно близкой виброустойчивости.

Резонансные крутильные вибрации могут возникать не только у шпинделя главного привода, но также у шпинделя привода круговой подачи или в обрабатываемых нежестких корпусных деталях, если частота их собственных вибраций соответствует частоте вынужденных вибраций, создаваемых главным приводом. Например, при фрезоточении цилиндрических заготовок источником резонанса крутильных и радиальных вибраций, а также дробления (автоколебаний) может стать токарный шпиндель, высокую радиальную жесткость которого существенно снижает влияние токарного кулачкового патрона и закреплённой в нём цилиндрической заготовки, особенно если она полая и алюминиевая.

Повышение частоты вращения шпинделей оказывает влияние на обработку алюминия больше, чем другого металла или сплава. Для резания конструкционных сталей и труднообрабатываемых материалов повышение частоты вращения шпинделя обычно сочетается с незначительным изменением глубины резания и подачи, которые определяются возможностями станка и инструмента. При обработке алюминия высокая частота вращения шпинделя в большинстве случаев сочетается с большой глубиной резания и это может приводить в безрезонансных диапазонах к возникновению дробления (автоколебаний), ухудшающих качество обработки, стойкость инструмента и долговечность шпинделя главного привода намного сильнее, чем принято считать [3].

Максимальная безрезонансная частота вращения шпинделя при скоростном фрезеровании алюминия, как правило, не является наилучшей для уменьшения дробления. Фактически при любом фрезеровании алюминия с частотой вращения шпинделя 15000 мин^{-1} и выше существует оптимальный диапазон частот, в котором резание происходит более стабильно и производительнее, чем при частотах выше или ниже этого диапазона. В оптимальном диапазоне глубину резания можно без дробления увеличить вдвое и втрое по сравнению с другими частотами [3].

Существует по меньшей мере три случая, когда отпадает необходимость поиска оптимального диапазона частот вращения шпинделя при фрезеровании алюминия. Один из них – это очень низкая частота вращения шпинделя, при которой естественное демпфирование будет достаточно велико, чтобы дробление не возникало. Во втором случае речь идет о небольших глубинах резания, например 1.25 мм и меньше, когда силы резания невелики и дробление незначительно. Третий случай возникает, когда все компоненты процесса фрезерования алюминия обладают очень высокой жесткостью (жестко закреплена заготовка, обладает высокой динамической жесткостью шпиндель с жестко закрепленной инструментальной

оснасткой и минимальным вылетом инструмента). В этом случае дробление также может быть незначительным, а максимальная безрезонансная частота вынужденных вибраций шпинделя может стать оптимальной для достижения максимальной объёмной производительности при силовой обработке алюминия.

Для высокопроизводительного фрезерования алюминия наиболее подходит концевая фреза с тремя зубьями, потому что при четырёх и более зубьях трудно обеспечить достаточный размер винтовой канавки для схода стружки. При высоких скоростях резания удаляемый алюминий может застревать в винтовых канавках с близко расположенными зубьями, делая фрезу похожей на «алюминиевое эскимо». Но и двух зубьев концевой фрезы тоже недостаточно из-за малой частоты вынужденных вибраций шпинделя. Концевая фреза должна иметь максимально короткий вылет и быть твердосплавной, так как такие фрезы обладают большей жесткостью и стойкостью, что даёт существенный экономический эффект. Необходимо выбирать большой угол наклона винтовой канавки концевой фрезы, но не более 35° , так как при большем значении излишне увеличивается сила растяжения, действующая на инструмент при резании.

Разница в сроках службы высокоскоростного шпинделя, выполняющего резание с высоким или с низким уровнем дробления, может быть разительной. Однажды в качестве эксперимента такой шпиндель намеренно поставили в условия работы с высоким уровнем дробления, чтобы узнать, как долго он сможет выдержать эти условия. Шпиндель вышел из строя через три часа [3]. Безусловно, работа при высоких частотах вращения ускоряет износ шпинделя, но не настолько, как можно предположить по частоте их замены на некоторых предприятиях. При надёжном контроле дробления шпиндель, используемый для высокоскоростного фрезерования, может прослужить от 3 до 5 лет.

Заключение. Приведённые результаты позволяют сделать следующие выводы:

– организациям, занимающимся эксплуатацией современных инверторных станков с ЧПУ, рекомендуется учитывать приведённые аналитические условия виброустойчивости при программировании безрезонансной работы станков;

– организациям, занимающимся производством современных инверторных станков с ЧПУ, рекомендуется включать в руководство по эксплуатации станков диаграмму виброустойчивости главного привода, адаптированную к параметрам конкретного станка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бушуев, В.В. Направления развития мирового станкостроения / В.В. Бушуев, Ф.С. Сабиров // Вестник МГТУ Станкин. – 2010. – № 1. – С. 24–30.
2. Стародубов, В.С. Мехатронные приводы в металлорежущих станках с ЧПУ / В.С. Стародубов // Известия вузов. Машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 275–279.
3. Потапов, В.А. Проблемы вибраций при высокоскоростном фрезеровании алюминия в авиакосмической промышленности и способы их решения / В.А. Потапов // Modern Machine Shop (по материалам журнала). 2001, январь.
4. Шатохин, С.Н. Безрезонансное фрезерование на станках с ЧПУ / С.Н. Шатохин, М.В. Брунгардт, А.В. Брунгардт // Технология машиностроения. – 2023. – № 11. – С. 5–10.
5. Металлорежущие станки: учебник для машиностроительных вузов / Под ред. В.Э. Пуша. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
6. Проектирование автоматизированных станков и комплексов: учебник / Под ред. П.М. Чернянского. Т. 1. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 301 с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Буханов С.А.¹ ✉, старший преподаватель, **Лагута В.С.**², генеральный директор, к.т.н., доцент, **Овсянников М.В.**¹, к.т.н., доцент

¹ *Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация*

² *ООО «Институт производственных исследований», г. Москва, Российская Федерация*

E-mail: bukhanov@yandex.ru

Рассмотрена задача формирования конфигурации производственной системы на этапах разработки концепции, проектировании, эксплуатации и реконфигурации. Представлена методика формирования конфигурации системы на основе описания планируемой номенклатуры выпуска набором требуемых операций на абстрактных позициях оснащения. Процесс выбора основного технологического оборудования осуществляется подбором выполняемых операций в системе ограничений.

Ключевые слова: производственная система, позиция оснащения, синтез конфигурации, система ограничений, метод удовлетворения ограничений

DESIGNING THE CONFIGURATION OF A PRODUCTION SYSTEM AT THE STAGES OF ITS LIFE CYCLE

Bukhanov S.A.¹ ✉, senior lecturer, **Laguta V.S.**², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Ovsyannikov M.V.**¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

² *“Institute of Industrial Researches” Ltd, Moscow, Russian Federation*

E-mail: bukhanov@yandex.ru

The task of forming the configuration of the production system at the stages of concept development, design, operation and reconfiguration. The method of forming its configuration based on the description of the planned product range by a set of required operations in abstract equipment positions is presented. The process of selecting the main technological equipment is carried out by selecting the operations performed in the restriction system.

Keywords: production system, technological position, configuration synthesis, constraint system, constraint satisfaction method

Обеспечение эффективности эксплуатации современного производства ставит перед разработчиками и эксплуатантами ряд задач, решение которых требует разработки новых методов и методик, учитывающих современные тенденции и возможности цифрового проектирования и производства [1].

Задача формирования производственной конфигурации является актуальной не только на начальных этапах создания/проектирования производственной системы (ПС), но и на этапе эксплуатации, когда необходимо оптимизировать/перестраивать ранее сформированную конфигурацию под изменяющееся состояние производственного заказа. Это может быть существенное изменение производственной программы выпуска изделий, включение в номенклатуру новых изделий (полуфабрикатов) и др.

Текущая производственная конфигурация предполагает фиксированный состав основного технологического оборудования (ОТО) и соответствующего технологического оснащения для обеспечения производства заданной номенклатуры в плановом периоде. Современные ПС

ориентированы на изменяющиеся условия функционирования прежде всего по номенклатуре выпускаемых изделий (полуфабрикатов), поэтому создаются с резервированием технико-технологических возможностей. Наиболее «продвинутым» типом таких производств являются реконфигурируемые производственные системы. Такие производства имеют возможность не только использовать расширенный перечень технологического оснащения на ранее выбранном (при проектировании) оборудовании, но и изменять сам состав применяемого технологического оборудования в зависимости от производственной ситуации. Именно поэтому задача формирования конфигурации ПС актуальна на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) производственной системы (рис. 1).

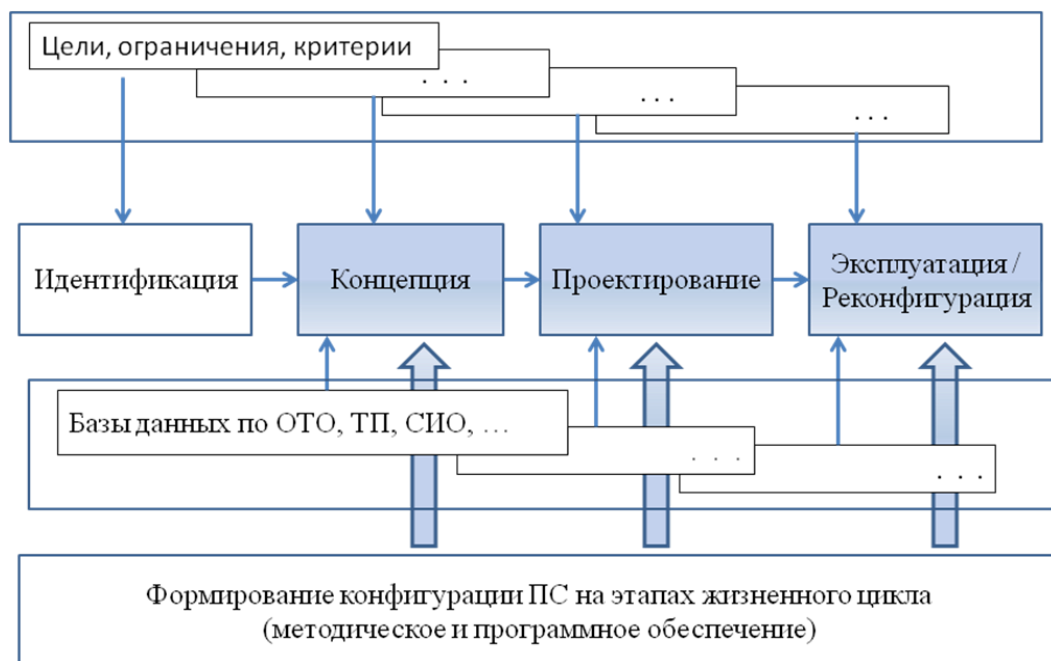


Рис. 1. Место задачи проектирования конфигурации ПС на этапах ЖЦ:

ОТО – основное технологическое оборудование; ТП – нормативные технологические процессы; СИО – система инструментообеспечения и технологического оснащения

Задачи структурного синтеза сложного объекта с наложенными ограничениями – в нашем случае это состав ОТО, обеспечивающего выпуск заданной номенклатуры изделий – **конфигурация ПС**, относится к классу комбинаторных и сводятся к выбору варианта из конечного множества решений. В основе задач лежит представление проблемной области в форме структурированных управляемых элементов, связанных сложными гетерогенными n -мерными ограничениями. Для решения подобных задач был разработан метод синтеза конфигурации на основе метода удовлетворения ограничений (CSP), позволяющий инженеру описывать и решать задачи, не прибегая к программированию сложных алгоритмов [2]. Целью проектирования конфигурации является получение допустимой конфигурации в соответствии с установленными требованиями, имеющей характеристики, наиболее близкие к оптимальным в соответствии с целевой функцией [3], заданной лицом, принимающим решения (ЛПР).

В задачах CSP вся система утверждений формулируется в виде конъюнкции отдельных выражений, называемых **ограничениями**. При формулировании задачи необходимо разбить исходную систему утверждений на максимальное число элементарных ограничений, выполнимость каждого из которых может быть проверена независимо от других. Каждое ограничение связывает между собой одну или несколько переменных задачи, что позволяет получить дополнительную информацию о конфликтности значений, присваиваемых переменным в задаче. Решение считается допустимым, если выполняются все установленные ограничения задачи.



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

В соответствии с выбранным методом решения данной задачи (рис. 2) каждой позиции конфигурации ПС должен быть поставлен в соответствие определенный объект, взятый из соответствующего справочника по доступным базам данных (БД) (см. рис. 1). При решении задачи происходит проверка правил и закономерностей формирования допустимой конфигурации ПС, а также требований к ее итоговым параметрам. Данные правила и закономерности описываются в виде выражений ограничений на специальном языке.

Особенность описания задачи проектирования конфигурации ПС создает эффект информированности процесса поиска за счет возможности оценки качества построенного решения (например, число нарушенных ограничений или отклонение величин параметров компонентов от требуемых). Это позволяет осуществить стратегию поиска с **любого случайного решения**, в том числе недопустимого. В качестве оценочной функции допустимых решений используется вычисленное значение задаваемой ЛПР целевой функции в соответствии с установленным критерием оптимальности.

Предложенные методы и алгоритмы были реализованы в виде программного обеспечения (ПО) – CMSolver [4]. ПО позволяет выполнять все этапы решения задачи от ее описания до получения и анализа результатов, разработано на языке C++ с использованием библиотеки STL для платформы Windows.

Все выражения задачи (ограничения и требования) образуют гиперграф ограничений (рис. 3). Каждое выражение включается в последовательность вычисления при условии наличия рассчитанных или доступных на данный момент значений параметров компонентов.

В процессе реализации методики решения выполняется последовательность из нескольких шагов для преобразования исходного множества сложных технологических операций подготовленных техпроцессов в набор позиций оснащения [5]. Последовательность преобразования включает дифференциацию (раздробление) исходных операций ТП на отдельные обособленные элементы с последующим обобщением и формированием позиций оснащения. Каждая позиция оснащения является базовым элементом и представляет обобщенную операцию, производящую близкие виды обработки с близкими параметрами размеров, точности, твердости, предварительного состояния поверхности и пр. При формировании позиции оснащения учитываются также общая схема обработки, схема установки, габариты и массы заготовки, ее свойства и конструктивно-технологические параметры, получаемые

в результате обработки поверхности. Позиция оснащения объединяет элементарные виды обработки, которые заведомо могут быть выполнены на одном виде технологического оборудования, что и обеспечивает возможность выбора (рис. 4).

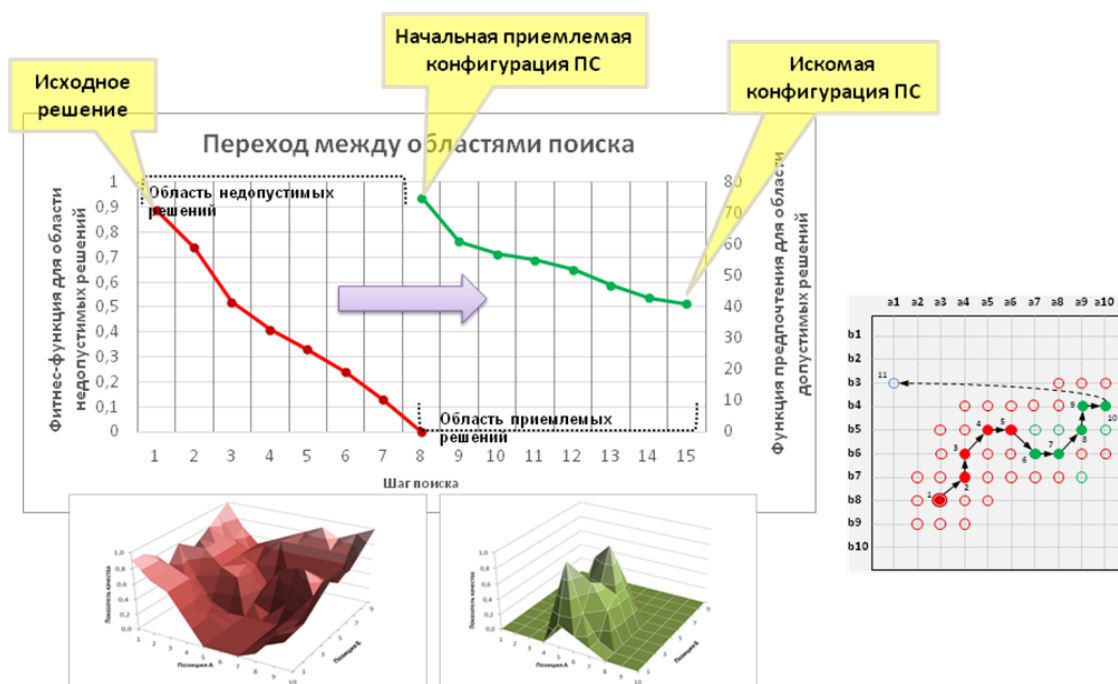


Рис. 3. Процесс поиска решений для получения требуемой конфигурации ПС

Пример проектирования конфигурации участка механообработки по изготовлению технологической оснастки для выпуска резинотехнических изделий представлен в [6]. Проведенные исследования вариантов возможных конфигураций ПС с использованием как ранее разработанных [2], так и оригинальных алгоритмов [7] определили итоговую конфигурацию участка. Анализ полученных результатов показал возможность формирования конфигурации для планируемой ПС и, соответственно, оценки минимального объема финансирования для ее создания.

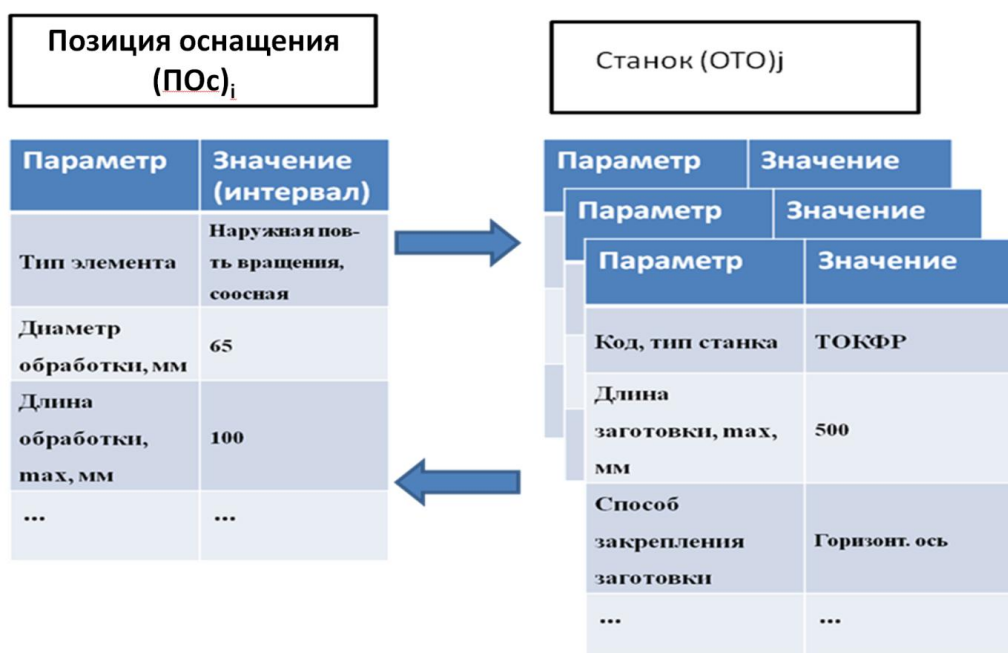


Рис. 4. Иллюстрация выбора в CMSolver из назначенной базы данных конкретного станка для текущей позиции оснащения

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лагута, В.С. Проектирование компьютерно-интегрированных производств в составе систем управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении / В.С. Лагута, С.И. Ясиновский // Вопросы инновационной экономики. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 1246–1257.
2. Овсянников, М.В. Управление конфигурацией методом программирования в ограничениях / М.В. Овсянников, С.А. Буханов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 14. – С. 70–75.
3. Levin, M.Sh. Modular systems design and evaluation / M.Sh. Levin. – Springer, 2015. – 473 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-09876-0.
4. Буханов, С.А. Исследование алгоритмов поиска решений в задачах структурного синтеза сложных изделий на основе метода удовлетворения ограничений / С.А. Буханов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Электрон. журн. – 2016. – 18 с.
5. Лагута, В.С. Учет неопределенности номенклатуры деталей для выбора качественного состава оборудования ГПС механообработки / В.С. Лагута, М.В. Овсянников // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 18–20 апреля 2023 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – С. 75–84.
6. Буханов, С.А. Синтез конфигурации производственной системы по изготовлению технологической оснастки для выпуска резинотехнических изделий / С.А. Буханов, В.С. Лагута, Д.С. Резниченко // Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП-2024): материалы Первой научно-практической конференции с международным участием. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – С. 41–45.
7. Product Requirement Modeling and Optimization Method based on Product Configuration Design / W. Weia, A. Liub, S.C.-Y. Lub, T. Wuest // Procedia CIRP 36. – 2015. – Pp. 1–5.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Галеев Д.И.¹, магистрант, Портянко С.А.², к.т.н., доцент

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² Полоцкий государственный университет им. Ефросинии Полоцкой,

г. Полоцк, Республика Беларусь

E-mail: idgaleev1@mail.ru

Приведены описание методов окончательной обработки ГТД и обзор существующих методов обработки. Рассмотрены вопросы формирования качества поверхностного слоя при механической обработке лопаток ГТД.

Ключевые слова: лопатки компрессора, глубинное шлифование, прогрессивный технологический процесс, оборудования для автоматизированной обработки, шлифовальные круги из КНБ, детали газотурбинных двигателей, электролитно-плазменное полирование

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR FINAL PROCESSING OF GAS TURBINE ENGINE BLADES

Galeev D.I.¹, Master's Degree student, Portyanko S.A.², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

² Polotsk State University named after Euphrosyne of Polotsk, Polotsk, Republic of Belarus

E-mail: idgaleev1@mail.ru

This article describes the methods for manufacturing the final turn of the GTE, an overview of existing processing methods. The work considers the issues of forming the quality of the surface layer during their mechanical processing.

Keywords: compressor blades, deep grinding, progressive technological process, equipment for automated processing, grinding wheels from CBN, gas turbine engine parts, electrolytic-plasma polishing

Газотурбинные двигатели (ГТД) играют ключевую роль в авиационной и энергетической отраслях, обеспечивая высокую эффективность и мощность. Одна из критически важных деталей в конструкции ГТД – это лопатки, которые работают в экстремальных условиях. Их окончательная обработка влияет на надежность, эффективность и срок службы двигателя. В связи с этим разработка технологий окончательной обработки лопаток ГТД является актуальной задачей для специалистов в области механической обработки и материаловедения.

Газотурбинные двигатели нового поколения имеют большие окружные скорости и значительные знакопеременные напряжения, компрессоры выполнены в виде блисков, к лопаткам которых предъявляются повышенные требования, в т. ч. эллиптическая форма входных кромок с шероховатостью $Ra < 0,25$ мкм, а также устойчивость к многоцикловой усталости [1]. Следует отметить, что материалы лопаток относятся к труднообрабатываемым и обладают неблагоприятной технологической наследственностью [3]. Это означает, что технология получения лопаток будет иметь прямое влияние на их конечные свойства. В этой связи технологическое обеспечение ресурса и эксплуатационной надежности лопаток блисков представляется комплексной задачей, при решении которой нужно учитывать особенности их материала и влияние на них каждого этапа производства – от заготовки до финишных операций. В данной работе представлен критический обзор существующих методов обработки лопаток, включающий поверхностно-пластическое деформирование (ППД), электролитно-плазменное полирование (ЭПП), методы обработки с помощью кругов.

Из всего многообразия существующих технологий изготовления лопаток можно выделить два основных варианта. Первый включает их изготовление из профилированных заготовок, полученных штамповкой, что позволяет снизить трудозатраты по обработке лопаточного венца, особенно для блисков небольших размеров. Главная особенность второго варианта технологии изготовления лопаток из монолитной непрофилированной заготовки состоит в том, что на черновой и получистовой операциях необходимо удалить практически весь объем металла из межлопаточного пространства, что значительно снижает эффективность черновой обработки. Однако несмотря на это, данный способ получил наибольшее распространение в промышленном производстве [1].

Основные этапы обработки лопаток ГТД:

1. Проектирование и подготовка.

Разработка технологии окончательной обработки начинается на стадии проектирования лопаток. Она включает в себя выбор материалов, геометрии и заданий по механическим свойствам. Основное внимание уделяется следующим факторам:

- тепловые свойства;
- устойчивость к коррозии;
- устойчивость к высокотемпературным воздействиям.

После завершения проектирования следует подготовительный этап, который включает в себя создание моделей и шаблонов для последующей обработки.

2. Первичная обработка.

Прежде чем приступить к окончательной обработке, лопатки проходят первичную механическую обработку, включая фрезерование и шлифование. Эти процессы необходимы для достижения заданных размеров и форм.

3. Окончательная обработка.

На этом этапе выполняется ряд операций, требующих высокой точности:

- шлифование: позволяет достичь необходимой гладкости поверхности, что критично для уменьшения трения и улучшения аэродинамических свойств. Современные технологии шлифования используют алмазные абразивы и специализированные шлифовальные машины;
- полирование: удаляет микронеровности и обеспечивает повышенное качество поверхности. Полировка проводится с использованием специальной пасты и полирующих материалов;
- нанесение защитных покрытий: включает термостойкие и коррозионностойкие покрытия, такие как жаропрочные сплавы или керамические материалы, которые увеличивают долговечность лопаток при высоких температурах;
- контроль качества: после окончательной обработки осуществляется тщательный контроль размеров, формы и качества поверхности с помощью компьютеризированных систем измерения и других высокоточных методов.

Одним из современных методов окончательной обработки является электролитно-плазменное полирование. Сущность этого метода заключается в том, что обрабатываемое металлическое изделие погружают в водный раствор нейтрального электролита при температуре 90–93 °С и прикладывают к нему положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение (около 280–300 В), при этом между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом образуется восходящий парогазовый слой. Пузырьки, схлопываясь на микровыступах, удаляют их, приводя к улучшению шероховатости поверхности до Ra 0,06–0,1 мкм [2]. В результате такой обработки поверхность детали подготавливается к следующему этапу – ионной имплантации. Ионная имплантация (ионное внедрение, ионное легирование) – введение примесных атомов в твердое тело бомбардировкой его поверхности ускоренными ионами, при которой происходит проникновение ионов вглубь материала.

Обрабатываемую лопатку 1 (рис. 1) устанавливают и закрепляют на держателе изделий 4 таким образом, чтобы стержни 3, выполненные из металла, были расположены параллельно входной и выходной кромкам 2 лопатки 1 с равномерным зазором, обеспечивающим в процессе полирования формирование общей парогазовой оболочки 6 для лопатки 1

и стержней 3 (рис. 2). Лопатку 1 с держателем погружают в ванну с водным раствором электролита 7, прикладывают к лопатке 1 положительный электрический потенциал, а к электролиту 7 – отрицательный, в результате чего достигают возникновения разряда между обрабатываемой лопаткой 1, стержнями 3 и электролитом. Процесс электролитно-плазменного полирования осуществляют в электрическом потенциале от 250 до 320 В.

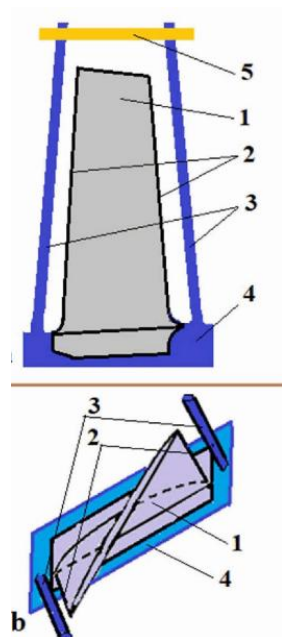


Рис. 1. Схема установки лопатки

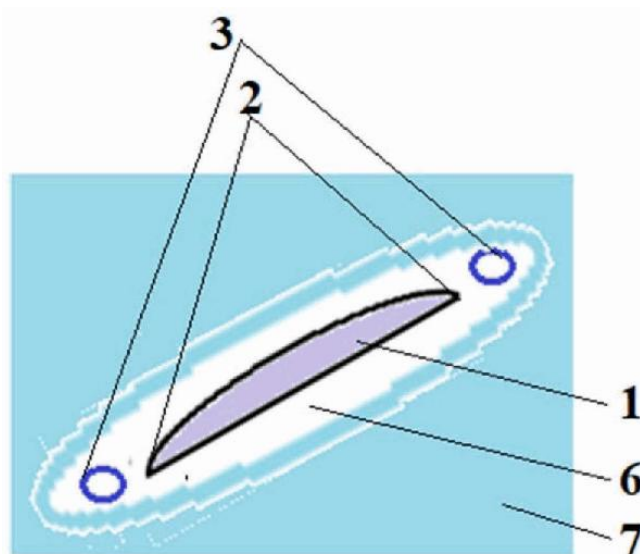


Рис. 2. Процесс полирования

На ПАО «ОДК-Кузнецов» используются полировальные войлочные круги (260×35), зерно 63С, F90–F180, паста М28. С помощью этих кругов добиваются нужной шероховатости $Ra = 0,08$ мкм, но это очень долгая и трудоёмкая работа.

При полировании войлочными кругами абразивную пасту наносят на поверхность лопаток. Процесс полирования осуществляется с постоянным вниманием к давлению и скорости вращения круга для избежания перегрева и повреждения материала. Полирование позволяет достичь высокой степени блеска и гладкости, что снижает трение и повышает коррозионную стойкость.

Полирование лопаток с использованием войлочных кругов – это ключевой этап в подготовке компонентов газотурбинных двигателей к эксплуатации. Высококачественная обработка поверхности улучшает их аэродинамические характеристики и обеспечивает надежную работу в условиях высокой температуры и давления.

Геометрические параметры кругов можно разрабатывать под конкретные лопатки с помощью программ Porous Microstructure Generator (PMG) и Porous Microstructure Analysis (PuMA).

PMG – это программное обеспечение, позволяющее генерировать 3D-структуры пористых материалов с использованием набора настраиваемых алгоритмов (рис. 3), разработанное для точного прогнозирования свойств материалов на основе микроструктуры материалов.

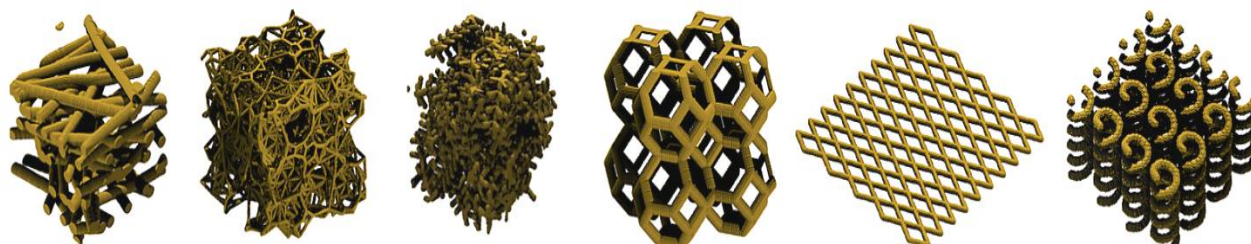


Рис. 3. Сгенерированные 3D-структуры пористых материалов

Porous Microstructure Analysis (PuMA) было разработано для вычисления эффективных свойств материалов и выполнения моделирования отклика материалов на оцифрованных микроструктурах пористых сред. PuMA может также создавать искусственные микроструктуры, имитирующие реальные материалы (рис. 4).



Рис. 4. Микроструктуры материалов, включая 2D и 3D тканые структуры, созданные в PuMA

Разработка технологий окончательной обработки лопаток ГТД – это высокотехнологичный процесс, требующий междисциплинарного подхода и постоянного обновления знаний. Эффективная окончательная обработка напрямую влияет на работоспособность и надежность газотурбинных двигателей, что делает этот процесс одним из ключевых в производственной цепочке. С учетом постоянных технологических обновлений и инновационных решений можно ожидать дальнейшего увеличения производительности и надежности ГТД в будущем.

Таким образом, современные предприятия, занимающиеся изготовлением деталей лопаток, могут выбрать программное обеспечение Porous Microstructure Generator и тем самым уменьшить расходы, не используя разные виды кругов для одной лопатки, а обойтись одной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олейник, А.В. К вопросу о технологии обработки поверхности лопаток блисков компрессора ГТД = On the issue of GTE compressor blisk blade surface treatment / А.В. Олейник, А.М. Смыслов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Машиностроение и машиноведение. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 17–24.
2. Porous Microstructure Generator [Электронный ресурс]. – URL: https://data.ncl.ac.uk/articles/code/Porous_Microstructure_Generator/20448471?file=41743935
3. Голованов, Д.С. Повышение эффективности обработки лопаток компрессора газотурбинного двигателя за счет применения многофункционального оборудования и современных шлифовальных кругов на основе кубического нитрида бора / Д.С. Голованов, М.В. Песин // Вестник ПНИПУ. Сер. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 23. – С. 92–99. – DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.11.

ШЕРОХОВАТОСТЬ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ВИБРОКОНТАКТНОМ ПОЛИРОВАНИИ

Галеев Д.И., магистрант, **Носов Н.В.**, д.т.н., профессор

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

Разработана технология полирования лопаток ГТД на виброконтактном станке ЛВП 4, определены режимы и условия обработки, позволяющие достигать требуемой шероховатости поверхности в два перехода, предложены зависимости для определения величины R_a , построены поля шероховатости поверхности и определены критические зоны, где шероховатость поверхности не достигается.

Ключевые слова: полирование, лопатки ГТД, виброконтактный станок, шероховатость поверхности, абразивная лента, зернистость, поля шероховатости, режимы обработки

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (Госзадания) FMRW-2025-0052

THE ROUGHNESS OF THE GTE BLADES IN VIBROCONTACT POLISHING

Galeev D.I., Master's Degree student, **Nosov N.V.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: nosov.nv@samgtu.ru*

A technology for polishing GTE blades on an LVP 4 vibrocontact machine has been developed, processing modes and conditions have been determined that make it possible to achieve the required surface roughness in 2 transitions, dependencies for determining the value of R_a have been proposed, surface roughness fields have been constructed, and critical zones where surface roughness is not achieved have been identified.

Keywords: polishing, GTE blades, vibrocontact machine, surface roughness, abrasive belt, grain size, roughness fields, processing modes

The work was carried out with the framework of the government order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FMRW-2025-0052)

Одной из перспективных технологий окончательной обработки лопаток ГТД является виброконтактное полирование (ЛВП) профиля пера лопаток. На производстве обработка профиля пера лопаток ГТД осуществляется вручную на полировальных бабках войлочными кругами. Для повышения производительности процесса полирования, точности и качества поверхности профиля пера лопаток применялся полуавтоматический виброполировальный станок ЛВП-4. В качестве инструментов использовались абразивные ленты, которые прижимаются к поверхности лопаток специальными ложементами, имеющими упруго-эластичное основание [1]. В качестве основы абразивных лент применяются бумага, ткани и фибра, на поверхности которых с помощью мездрового клея закрепляются абразивные зерна. Замок лопатки ГТД устанавливается в специальном приспособлении с рабочими поверхностями, имеющие форму «ласточкиного хвоста». Приспособление с лопаткой при полировании осуществляет три движения: вертикальное колебание, горизонтальное колебание и вращательное в вертикальном направлении. Лопатка ГТД подается в рабочую зону, затем ложементы со стороны спинки и корыта с помощью гидравлики прижимаются к лопатке. В качестве

инструмента применяется абразивная лента из зерен электрокорунда или карбида кремния на бумажной и тканевой основах с зернистостью от 6 до 25. Абразивная лента помещается между поверхностью лопатки и резиновыми ложементами. Лопатка ГТД в процессе полирования без охлаждения осуществляет сложное движение в двух взаимно перпендикулярных направлениях, образуя фигуру Лиссажу. После обработки лопатки рабочая поверхность ленты теряет свою работоспособность, так как отходы полирования заполняют межзерновое пространство, поэтому для обработки следующей лопатки используют новые участки абразивной ленты. Исследовалось качество поверхности при виброконтактном полировании профиля пера лопаток первой ступени газотурбинных двигателей из труднообрабатываемого жаропрочного сплава ЖС-6ФВИ на никелевой основе на полуавтоматических станках ЛВП-4 (рис. 1) с отношением частот вертикального и горизонтального колебаний $\omega_0 = 0,833$ абразивными лентами с зёрнами 63С, зернистостью 16 и 6 в два перехода: один переход П863С16ПМА и второй переход П863С6НМА

Предварительно поверхность лопатки шлифуется накатными абразивными войлочными кругами на полировальных бабках.

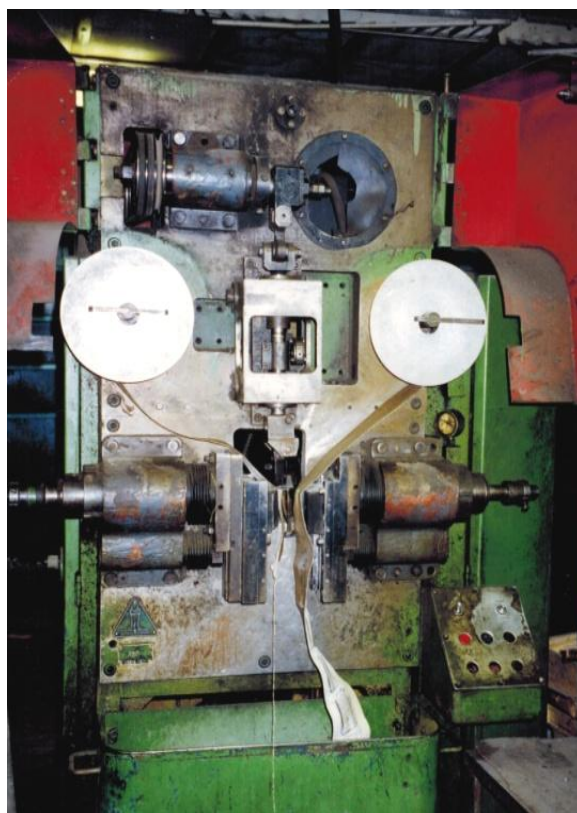
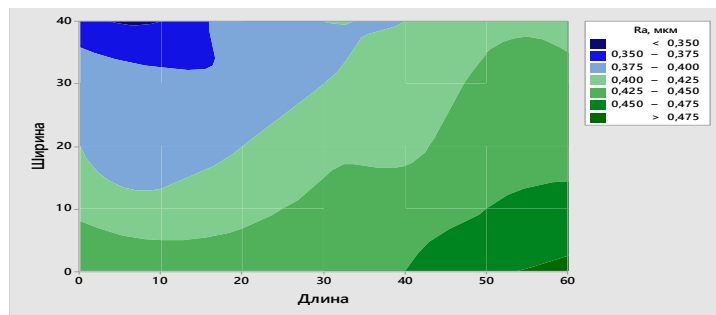


Рис. 1. Станок ЛВП-4 для полирования лопаток ГТД

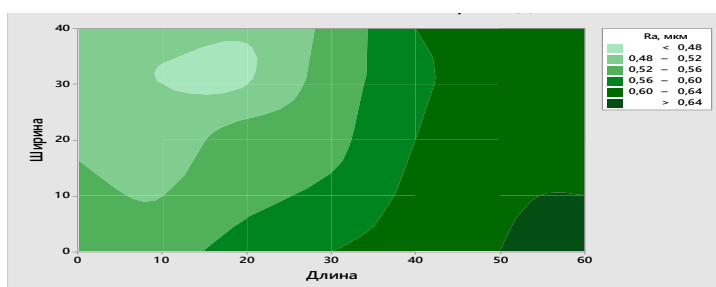
Исследование шероховатости поверхности производилось на профилографепрофилометре модели «Абрис» [2]. Замеры проводились на лопатках по профилю пера до и после обработки их элементов. Виброконтактное полирование на полуавтоматических станках ЛВП-4 позволяет уменьшить шероховатость с $R_a = 2,5$ мкм до $R_a = 0,3-0,5$ мкм по всему профилю поверхности при первом переходе.

Установлено, что на величину R_a в большей степени влияние оказывают зернистость абразивных лент N_z , скорость полирования V м/мин, соотношение частот ω_0 , рабочее давление p , МПа.

На рис. 2 показаны поля шероховатости поверхности лопаток по спинке и корыту после первого перехода, которые позволили установить места, где шероховатость поверхности выше требуемой $R_a = 0,5-0,7$ мкм: такими участками были поверхности на корыте в районе бандажной полки.



а



б

Рис. 2. Поля шероховатости поверхности лопатки первой ступени турбины после ЛВП по первому переходу:
а – спинка, б – корыто

При обработке лентами из 63С увеличение давления p от 0,2 до 1,0 МПа повышает R_a в 1,2–1,4 раза. В то же время при обработке абразивными лентами с зёрнами 63С получена шероховатость на 10–12 % ниже, чем при полировании зёрнами 14А. По результатам исследования построены регрессионные зависимости влияния режимов полирования на величину R_a . Для расчета лентами из зёрен 63С

$$R_a = 0,12 \cdot p^{0,2} \cdot V^{-0,31} \cdot \tau^{-0,36} \cdot N_3^{0,81}, \quad (1)$$

а для зерен 14А

$$R_a = 0,2 \cdot p^{0,21} \cdot V^{-0,35} \cdot \tau^{-0,4} \cdot N_3^{0,8}, \quad (2)$$

где p – давление, МПа, V – скорость, м/мин, τ – время, сек, N_3 – номер зернистости.

Например, рассчитанная величина R_a при обработке с режимами $p = 0,5$ МПа, $V = 31$ м/мин, $\tau = 7,5$ сек, $N_3 = 16$ составила для лент из 63С $R_a = 0,167$ мкм, а для лент из 14А $R_a = 0,21$ мкм, т. е. шероховатость уменьшалась на 20 %.

Таким образом, разработана технология полирования лопаток ГТД на виброконтантном станке ЛВП-4, определены режимы и условия обработки, позволяющие достигать требуемой шероховатости поверхности в два перехода, предложены зависимости для определения величины R_a , построены поля шероховатости поверхности и определены критические зоны, где шероховатость поверхности не достигается.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Качество машин: справ. В 2 т. / А.Г. Суслев, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.
2. Иванов, Ю.И. Эффективность и качество обработки инструментами на гибкой основе / Ю.И. Иванов, Н.В. Носов. – М.: Машиностроение, 1985. – 88 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОТЫ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT-12 ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ЧИСЛА РЕЖУЩИХ СЕГМЕНТОВ И РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

Гордиенко Я.М., аспирант

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: gordienko120@yandex.ru

Рассмотрены особенности и проблемы обработки титана марки VT-12. Исследованы результаты возникновения волнистости при обработке прерывистыми кругами на вулканитовой связке с изменением числа режущих сегментов. В результате изучения зависимостей было выявлено наиболее благоприятное количество режущих сегментов для обработки титана марки VT-12.

Ключевые слова: волнистость, материал, резание, прерывистое шлифование, сплав, титан, шлифовальный круг, зависимость, режимы резания, режущие сегменты, вулканит

INVESTIGATION OF THE UNDULATION HEIGHT DURING INTERMITTENT GRINDING OF VT-12 TITANIUM ALLOY BY CHANGING THE NUMBER OF CUTTING SEGMENTS AND CUTTING MODES

Gordienko Ya.M., PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: gordienko120@yandex.ru

This article summarizes the results of previous studies, features and problems of processing titanium grade VT-12. The results of the occurrence of undulation during processing with discontinuous circles on a vulcanite bundle with a change in the number of cutting segments are investigated. As a result of the study of dependencies, a favorable number of cutting segments for processing titanium of the VT-12 brand was identified.

Keywords: undulation, material, cutting, intermittent grinding, alloy, titanium, grinding wheel, dependence, cutting modes, cutting segments, vulcanite

Известно, что процесс шлифования металлов неизбежно сопровождается возникновением различных дефектов вследствие действия широкого спектра факторов, начиная от точности изготовления и сборки деталей технологического оборудования инструментов и оснастки и заканчивая принятыми режимами обработки. Для процесса прерывистого шлифования характерным является возникновение волнистости вследствие вибраций прерывистого круга. Правильные подбор шлифовального инструмента, режимов резания, настройка и исправность технологического оборудования и оснастки, своевременная правка инструмента и использование СОЖ в большинстве случаев позволяют минимизировать возникновение волнистости, что требуется для достижения высокого качества обработанной поверхности, стойкости шлифовального инструмента и долговечности опор шпиндельных узлов.

Была произведена обработка титанового сплава VT-12 на плоскошлифовальном станке 3Г71. Скорость резания $V = 25; 30; 35$ м/с, продольная подача заготовки составила $S_{пр} = 5; 7,5; 10$ м/мин.

Оправки (рис. 1) прерывистых кругов изготавливались из круглых заготовок дюралюминиевого сплава марки Д16Т методом механической обработки на фрезерном станке с ЧПУ. Абразивные бруски (рис. 2) закрепляются в пазы оправки с помощью эпоксидной смолы. Одна из отличительных черт данной конструкции заключается в том, что после износа

брусков они могут быть извлечены из оправки и заменены на новые. Готовые шлифовальные круги проходят балансировку и испытания на прочность для обеспечения безопасной работы.



Рис. 1. Оправка прерывистого шлифовального круга для 16 режущих сегментов



Рис. 2. Абразивные бруски на вулканитовой связке

Исследование качества обработанной поверхности после шлифования титановых сплавов осуществлялось с помощью автоматического профилометра Mitutoyo Surftest SJ-410.

Результаты измерения волнистости после обработки титанового сплава ВТ-12 приведены в таблице.

Влияние режущих сегментов на высоту волнистости после обработки титанового сплава ВТ-12

| Количество режущих сегментов | Диапазон высоты волнистости после обработки титана ВТ-12 |
|------------------------------|--|
| 4 | От 500 мкм до 3500 мкм |
| 6 | от 200 мкм до 1400 мкм |
| 8 | от 100 мкм до 700 мкм |
| 10 | от 50 мкм до 350 мкм |
| 12 | от 50 мкм до 200 мкм |
| 14 | от 20 мкм до 120 мкм |
| 16 | от 20 мкм до 120 мкм |
| 18 | от 5 мкм до 40 мкм |
| 20 | от 5 мкм до 20 мкм |

По окончании обработки были получены результаты волнистости для следующего числа режущих сегментов: 4 шт., 6 шт., 8 шт., 10 шт., 12 шт., 14 шт., 16 шт., 18 шт., 20 шт. (рис. 3). В соответствии с математической моделью, предложенной А.В. Якимовым, и с помощью программного продукта Microsoft были получены зависимости высоты волнистости от числа режущих сегментов и режимов обработки. Рассмотрим более подробно каждый из них.

Результаты сравнения зависимостей были объединены в итоговый график (рис. 4). Полученные данные позволили сформулировать вывод: 16 режущих сегментов являются самым благоприятным количеством из использованных в эксперименте при обработке титанового сплава ВТ-12 для достижения минимальной волнистости.

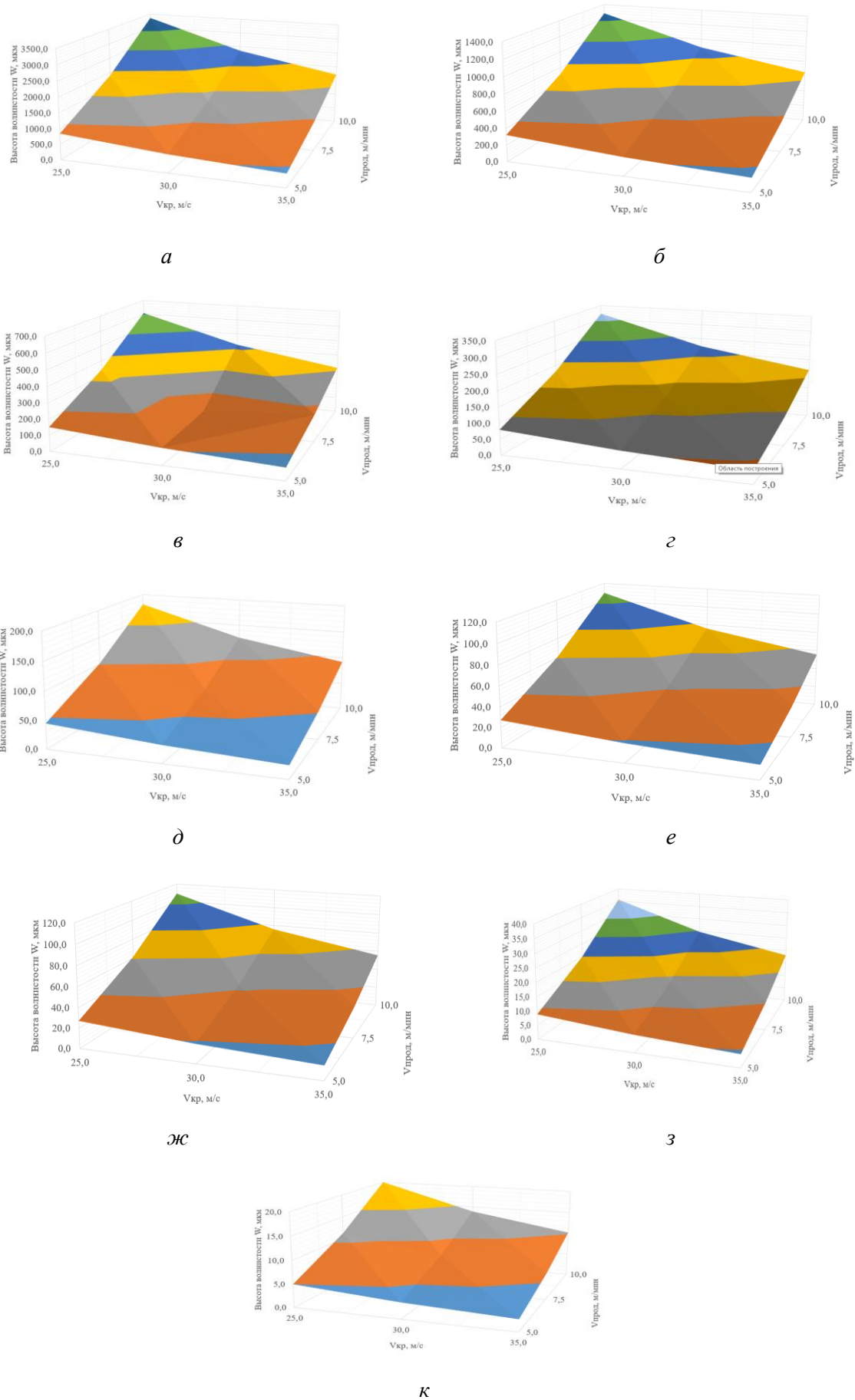


Рис. 3. Высота волнистости при различном количестве режущих сегментов:
 а – 4 шт.; б – 6 шт.; в – 8 шт.; г – 10 шт.; д – 12 шт.; е – 14 шт.; ж – 16 шт.; з – 18 шт.; к – 20 шт.

Данный вывод обуславливается тем, что, во-первых, высота волнистости не превышает 100,0 мкм во всем диапазоне рассматриваемых режимов резания, а во-вторых, хотя с повышением числа режущих сегментов от 16 до 20 шт. значительно уменьшается волнистость поверхности, с ростом числа режущих брусков круг постепенно приближается по конструкции к сплошному кругу, а значит, будет явный прирост температуры в зоне резания. Повышение температуры ведет к возможности возникновения дефектов поверхности, а значит, отрицательно повлияет на качество обработанной поверхности.

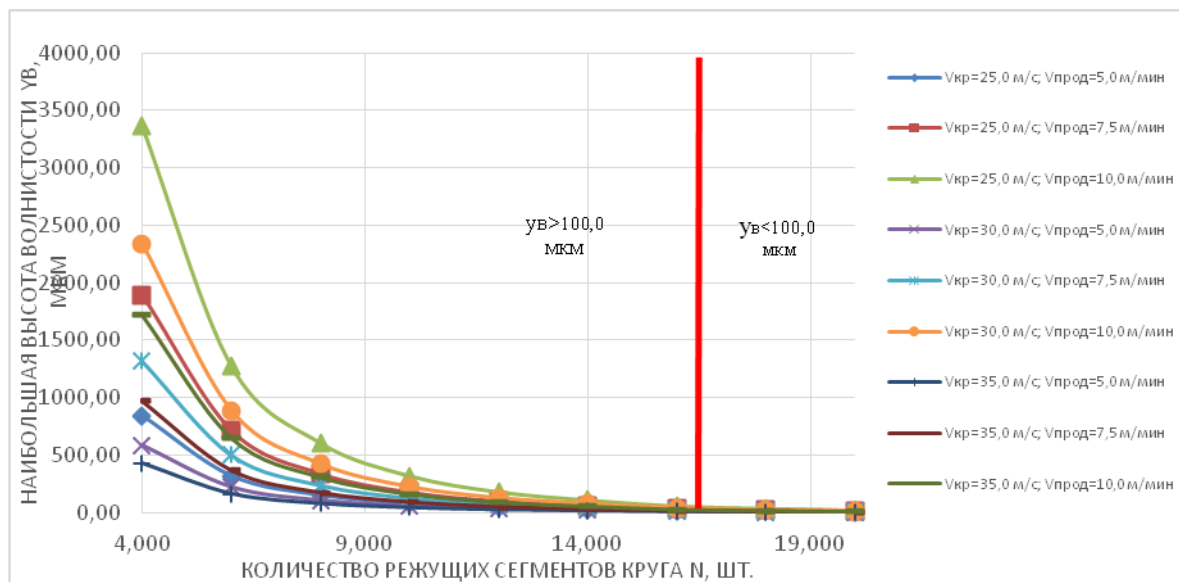


Рис. 4. График совокупности всех предыдущих зависимостей

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маслов, А.Р. Обработка труднообрабатываемых материалов резанием: учебное пособие / А.Р. Маслов, А.Г. Схиртладзе. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 208 с.
2. Рыжкин, А.А. Обработка материалов резанием: учебное пособие / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 411 с.
3. Смолянов, Г.А. Обработка титана и его сплавов за рубежом / Г.А. Смолянов, Г.Н. Кручер. – М.: Центральный институт информации, 1957. – 155 с.
4. Моряков, О.С. Материаловедение / О.С. Моряков. – М.: Академия, 2012. – 288 с.
5. Зубарев, Ю.М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев. – СПб.: Лань, 2010. – 304 с.
6. Никифоров, И.П. Современные тенденции шлифования и абразивной обработки / И.П. Никифоров. – М.: ООО «ТНТ», 2012. – 560 с.
7. Якимов, А.В. Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании: учебное пособие / А.В. Якимов, В.О. Ткаченко и др. – Одесса: Одесский государственный политехнический университет, 1998. – 272 с.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ

Гришин Р.Г., доцент, к.т.н., доцент, Гордиенко Я.М., аспирант

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: gordienko120@yandex.ru*

Настоящая статья посвящена аналитическому обзору современного состояния технологических решений в области прерывистого шлифования. Проанализированы известные конструкции цельных, сборных прерывистых шлифовальных кругов, а также шлифовальных кругов с текстурированной рабочей поверхностью. Определены перспективные направления совершенствования конструкции шлифовальных кругов для реализации операций прерывистого шлифования.

Ключевые слова: абразив, прерывистое шлифование, рабочая поверхность, теплонапряженность, шлифовальный круг

THE CURRENT STATE OF DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE FIELD OF INTERMITTENT GRINDING

Grishin R.G., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Gordienko Ya.M., PhD student

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: gordienko120@yandex.ru*

This article is devoted to an analytical review of the current state of development of technological solutions in the field of intermittent grinding. The well-known designs of solid, prefabricated intermittent grinding wheels, as well as grinding wheels with a textured work surface, are analyzed. Promising directions for improving the design of grinding wheels for the implementation of intermittent grinding operations have been identified.

Keywords: abrasive, intermittent grinding, working surface, heat stress, grinding wheel

Основным элементом, отличающим процесс прерывистого шлифования от прочих его разновидностей, является использование специфического шлифовального инструмента, обладающего дискретной рабочей поверхностью. В настоящее время известна достаточно широкая номенклатура способов дискретизации процесса шлифования, охватывающая использование сборных и цельных прерывистых шлифовальных кругов, а также цельных прерывистых шлифовальных кругов с текстурированной рабочей поверхностью.

Одним из ранних решений в области технологического обеспечения процесса прерывистого шлифования являются конструкции цельных прерывистых шлифовальных кругов, описанные в работах А.В. Якимова [1] и В.А. Сипайлова [2], общий вид которых представлен на рис. 1. Конструктивно тело приведенных кругов формируется из гетерогенной смеси абразива и связующего по аналогии с традиционными сплошными кругами. При этом формирование таких кругов предусматривает выполнение на их поверхностях, расположенных определенным образом, пазов, служащих для дискретизации рабочей поверхности.

Известна конструкция цельного прерывистого шлифовального круга (рис. 2) [3], отличающаяся тем, что пазы круга, не участвующие в процессе резания, заполняются твердым или пластичным смазочным материалом. Предложенный в изобретении подход позволяет улучшить условия работы и повысить стойкость круга за счет более эффективной подачи смазочного материала непосредственно в зону резания. При этом прерывание процесса резания

также позволяет добиться описанных ранее эффектов, выраженных в снижении теплонапряженности зоны резания.

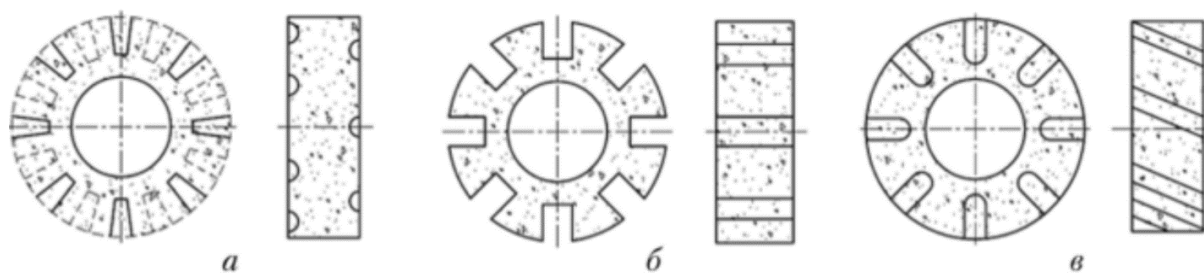


Рис. 1. Вариации конструкции цельных прерывистых шлифовальных кругов:
a – с торцевыми пазами, *б* – с периферийными прямыми пазами,
в – с периферийными наклонными пазами

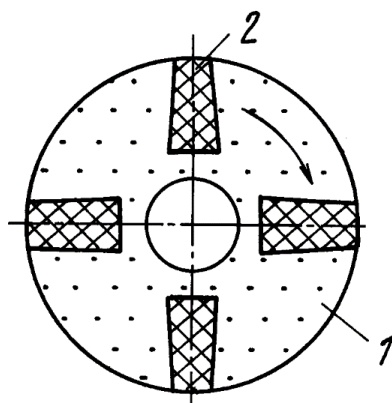


Рис. 2. Конструкция прерывистого шлифовального круга
 со вставками смазывающего материала:
 1 – шлифовальный круг, 2 – вставка смазывающего материала

Среди ключевых недостатков приведенных выше решений в области прерывистого шлифования цельными кругами можно выделить сложность изготовления, а также пониженную прочность шлифовальных кругов.

Известна конструкция конического прерывистого шлифовального круга [4], представляющая собой металлический корпус, на котором по усеченной конической поверхности базируется и закрепляется посредством специальных фиксаторов абразивонесущее кольцо с черновыми прерывистыми (по краям) и чистовой сплошной (по центру) рабочими поверхностями (рис. 3). Перфорированные прерывистые торцевые части круга вследствие пониженной жесткости приобретают демпфирующие свойства. За счет этого в совокупности с прерыванием процесса резания происходит снижение величины действующих в периферии профиля круга сил резания, а также сужение зоны термического влияния.

Среди недостатков приведенного решения помимо высокой конструктивной сложности и низкой надежности можно отметить вероятность возникновения повышенных вибраций, связанных с низкой жесткостью и неравномерностью работы (вследствие наличия прорезей) торцевых частей круга. К тому же повышенный износ прерывистой части круга в совокупности с её высокой упругостью и малой толщиной абразива создают условия для выраженного неравномерного износа абразива и низкой стойкости инструмента.

В работе А.В. Морозова [5] приводится описание концепции сборного шлифовального круга с радиальными промывными каналами и сплошными абразивными сегментами на твердой связке. Отличительной особенностью предложенной концепции является использование рабочих сегментов, полностью выполненных из абразивного материала на твердой связке. Позиционирование и закрепление рабочих сегментов в корпусе круга предусматривается

посредством разъемного соединения с конфигурацией типа «ласточкин хвост». Недостатками предложенного решения являются отсутствие детальной конструктивной проработки, потенциально высокая конструктивная сложность, а также необходимость конструктивной переработки технологического оборудования, обусловленные реализацией радиального подвода СОЖ.

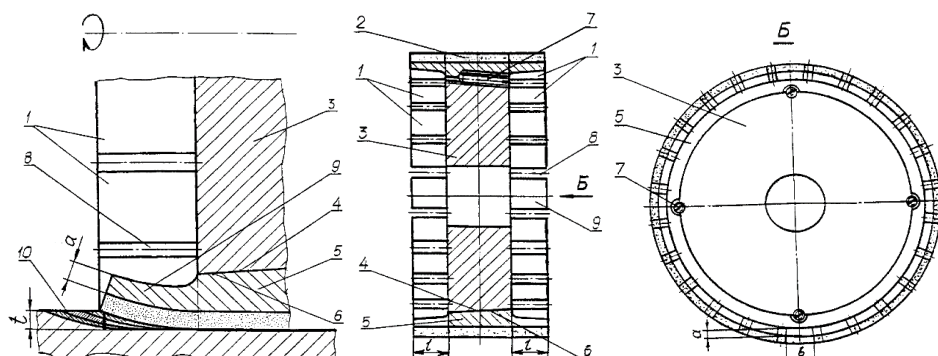


Рис. 3. Конструкция прерывистого шлифовального круга с абразивонесущим коническим кольцом:

- 1 – прерывистая рабочая часть, 2 – сплошная рабочая часть, 3 – корпус,
- 4, 6 – базировочная поверхность корпуса и абразивонесущего кольца,
- 5 – абразивонесущее кольцо, 7 – винты, 8 – радиальные пазы,
- 9 – демпфирующие выступы, 10 – срезаемый слой; t – глубина резания,
- a – толщина демпфирующей (черновой) части абразивонесущего кольца, b – шаг прорезей

Схожее исполнение рабочих абразивных сегментов круга находит свое отражение в изобретении [6], где также предусматривается использование абразивных рабочих сегментов круга из сплошного абразивного материала на твердой связке, устанавливаемых в корпусе инструмента посредством разъемного соединения типа «ласточкин хвост» (рис. 4). Преимуществами данной конструкции является возможность быстрой замены изношенных рабочих сегментов, а также выполнение их из сплошного абразивного материала, что позволяет достичь более высокой стойкости инструмента. Можно отметить использование в описанной конструкции упругих элементов, служащих для создания натяжения, необходимого для базирования брусков в соединении «ласточкин хвост», которые также могут служить в качестве демпфера для частичной компенсации радиальных вибраций, возникающих при работе круга.

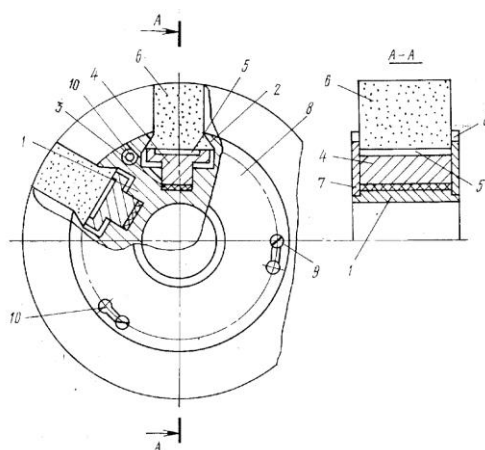


Рис. 4. Сборный прерывистый шлифовальный круг:

- 1 – корпус, 2 – скосы Т-образных пазов, 3 – упругие подкладки, 4 – опорные элементы,
- 5 – вырезы, 6 – абразивные сегменты, 7, 8 – крышки торцевые, 9 – винты, 10 – пазы

Среди прочих недостатков описанных выше конструкций шлифовальных кругов для реализации метода прерывистого шлифования стоит отметить необходимость использования абразивных вставок и абразивонесущих элементов специфической конструкции, что при

заведомо более интенсивном износе прерывистых шлифовальных кругов предопределяет заведомо более высокие в сравнении со стандартными конструкциями шлифовальных кругов эксплуатационные затраты, связанные с восстановлением режущей способности при естественном эксплуатационном износе рабочей части круга.

Еще одним направлением в области разработки шлифовальных кругов для реализации прерывистого шлифования является разработка шлифовальных кругов с текстурированной рабочей поверхностью (рис. 5). Отличием кругов данной конструкции является наличие активных и пассивных зон, чередование которых на периферии круга и обеспечивает достижение требуемого эффекта прерывания процесса резания. Текстурирование рабочей поверхности таких кругов достигается за счет избирательного нанесения слоя абразива в соответствии с заданным рисунком структуры [5].

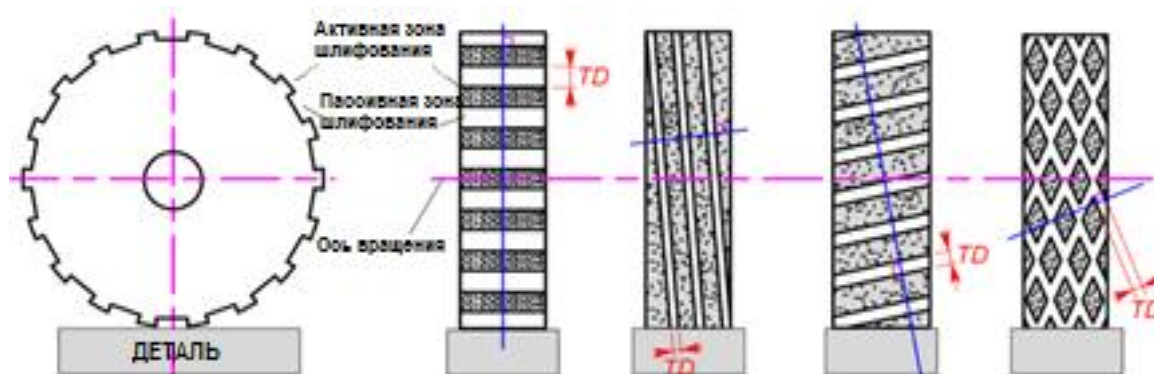


Рис. 5. Вариации конфигурации рабочей поверхности текстурированных прерывистых шлифовальных кругов:
TD – размер пассивной зоны

Текстурированные шлифовальные круги отличаются простой конструкцией, так как, по сути, состоят лишь из цилиндрического корпуса, на поверхности которого нанесен тонкий слой абразива, а также относительно простой технологией изготовления, так как при их изготовлении могут применяться традиционные технологии тонкослойного нанесения абразива или же прогрессивные технологии лазерного текстурирования. К тому же текстурирование позволяет реализовывать широкий спектр конфигураций рабочей поверхности круга без усложнения и значительного изменения технологии производства. Вместе с тем использование тонкослойного абразива, как отмечалось ранее, способствует радикальному снижению стойкости шлифовальных кругов, что также негативно сказывается на технико-экономических показателях их эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Якимов, А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. – Киев – Одесса: Вища школа, 1986. – 176 с.
2. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
3. Худобин, Л.В. Шлифование композиционными кругами / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2004. – 256 с.
4. Способ шлифования поверхностей кругом с прерывистой и непрерывной рабочей поверхностью: пат. 2155661 Рос. Федерация. № 98121673/02 / Степанов Ю.С., Афонасьев Б.И., Подзолков М.Г., Бородин В.В.; заявл. 26.11.1998; опубл. 10.09.2000. – 7 с.
5. Морозов, А.В. Лабораторный практикум по дисциплинам «Прогрессивные конструкции абразивного инструмента» и «Современные процессы абразивной обработки» / А.В. Морозов, В.Г. Гусев. – Владимир: Изд-во Владимирского государственного университета, 2009. – 84 с.
6. Абразивный круг: пат. 779058 СССР № 2609711 / Гусев В.Г.; заявл. 09.03.1978; опубл. 15.11.1980. – 3 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА

Зверев И.А.¹, д.т.н., профессор, **Слесарев В.В.**², магистрант

¹ *Московский государственный технологический университет (МГТУ «СТАНКИН»),
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: i.a.zverev@stankin.ru*

² *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: vlads06@yandex.ru*

С целью повышения качества проектирования шпиндельных узлов на опорах качения в системе ANSYS разработана тепловая модель для численной оценки тепловых характеристик высокоточных шпиндельных узлов. Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований температурного поля шпиндельного узла обрабатывающего центра.

Ключевые слова: шпиндельный узел; подшипник качения; тепловая модель; тепловые характеристики; метод конечных элементов

RESEARCH OF THE TEMPERATURE FIELD OF THE SPINDLE UNIT

Zverev I.A.¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Slesarev V.V.**², Master's Degree student

¹ *Moscow State University of Technology (MSUT "STANKIN"), Moscow, Russian Federation
E-mail: i.a.zverev@stankin.ru*

² *Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russian Federation
E-mail: vlads06@yandex.ru*

In order to improve the quality of engineering spindle units on rolling bearings, a thermal model for simulation of thermal characteristics of high-precision spindle units has been developed in the ANSYS system. The results of simulation and experimental studies of the temperature field of the spindle unit of a machining center are presented.

Keywords: spindle unit; rolling bearing; thermal model; thermal characteristics; finite element method

При анализе точности работы металлорежущих станков необходимо принимать во внимание тепловые характеристики их шпиндельных узлов (ШУ) [1, 4]. Повышение быстроходности ШУ ограничено чрезмерным нагревом их подшипников и встроенного привода, что должно учитываться при проектировании и эксплуатации ШУ.

Для численной оценки тепловых характеристик широкое применение получил метод конечных элементов (МКЭ) [3], который позволяет учитывать основные особенности конструкций и условий эксплуатации ШУ. В настоящей работе расчетный анализ температурного поля типового ШУ на опорах качения выполнен в системе ANSYS. Измерения температурного поля ШУ проведены с использованием тепловизора.

Разработанная тепловая модель ШУ включает следующие элементы:

- расчет теплообразования в подшипниках и элементах встроенного привода;
- расчет коэффициентов конвективной теплоотдачи с неподвижных и вращающихся поверхностей узла;
- расчет температурного поля шпиндельного узла в системе ANSYS.

При разработке тепловой модели принято допущение, что тепловыделение в отдельном подшипнике распределяется между наружным и внутренним кольцами в одинаковой пропорции, а сами подшипники представлены как кольцевые источники тепла.

Также в расчете приняты следующие условия:

– потери на трение и тепловыделение в опорах ШУ зависят от множества факторов [4] и определяются по методике А. Пальмгрена [1], а вязкость смазочного материала в них зависит от температуры и определяется по зависимостям, приведенным в [1, 6];

– значения коэффициентов теплоотдачи с поверхностями ШУ определяются в зависимости от температуры и скорости движения поверхности.

Для конкретных условий эксплуатации ШУ в расчетах обычно используют некоторые средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхностями ШУ, которые можно оценить по зависимостям, приведенным в работе [5].

Расчетно-экспериментальное исследование температурного поля выполнено для шпинделя с ременным приводом и с частотой вращения 12000 мин^{-1} (рис. 1). В передней опоре ШУ установлены радиально-упорные подшипники с внутренним диаметром 90 мм (GMN) по схеме «триплекс», которые смазываются консистентной смазкой (KLUBER SPEED BF 72-23). Во время испытаний (обкатки) ШУ охлаждения не используют. Расчетное тепловыделение в передних подшипниках составляет примерно по 800 Вт, а в задних – по 600 Вт.

Расчет температурного поля выполнен МКЭ в системе ANSYS. В расчетной схеме ШУ использованы осесимметричные тороидальные четырехугольные конечные элементы (рис. 2, а). Расчетное температурное поле конструкции ШУ представлено на рис. 2, б.

Расчетный анализ показал, что значения коэффициентов теплоотдачи с поверхностями ШУ, которые зависят от частоты вращения, оказывают существенное влияние на его температурное поле. Так, например, с ростом скорости вращения открытых поверхностей шпинделя доля тепла, отводимого шпинделем от опор, может достигать 40–60 %. В расчетном анализе для учета различных условий естественного и вынужденного охлаждения ШУ мы варьировали коэффициенты теплоотвода с поверхностями ШУ в пределах $20\text{--}220 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

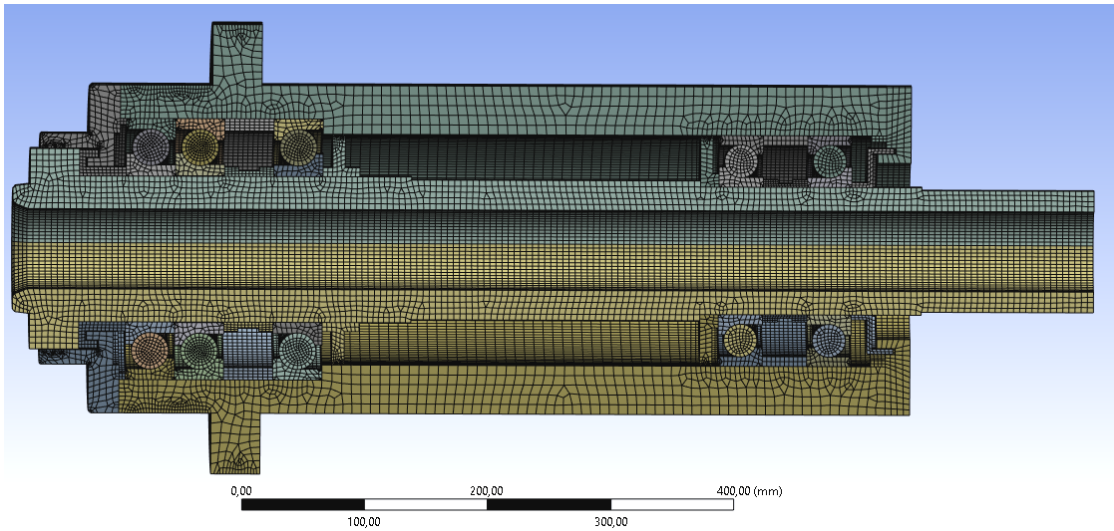
Расчетная максимальная температура подшипников достигает примерно 52 °C , а температура наружной поверхности корпуса в районе установки наружных колец подшипников передней опоры примерно 40 °C , а задней опоры 35 °C (см. рис. 2, б).

Измерения температурного поля на наружной поверхности корпуса ШУ выполнены с помощью тепловизора мод. TEi-P с неохлаждаемым детектором FPA (рис. 3).

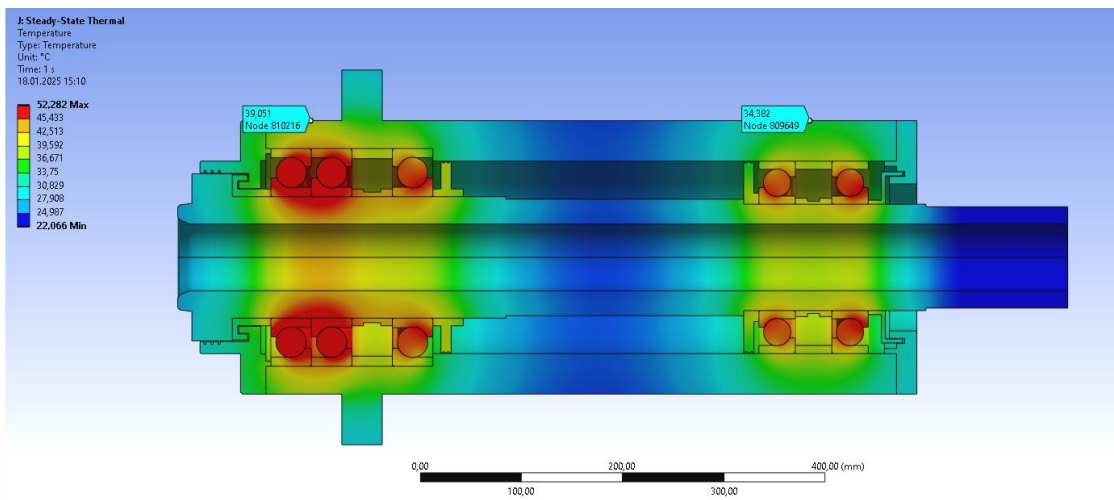
Из рис. 3, б видно, что наибольшие температуры ($40\text{--}42 \text{ °C}$) наружной поверхности корпуса возникают в местах расположения шпиндельных опор. Из сравнения рис. 2, б и рис. 3, б следует, что относительная погрешность расчетных и экспериментальных значений температур на корпусе ШУ не превышает 10 %, что подтверждает адекватность тепловой модели ШУ.



Рис. 1. Шпиндельный узел обрабатывающего центра



a

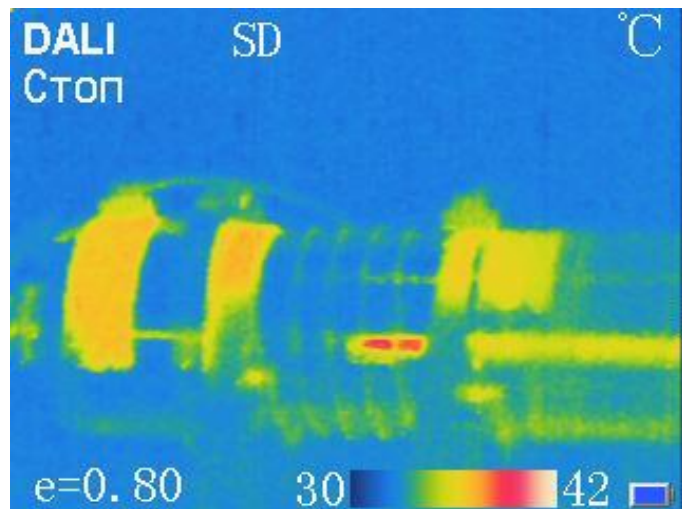


б

Рис. 2. Результаты расчета шпиндельного узла:
a – расчетная схема; *б* – температурное поле



a



б

Рис. 3. Результаты измерения:
a – тепловизор TEi-P; *б* – температурное поле корпуса шпинделя

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. На основе МКЭ разработана тепловая модель ШУ, которая практически реализована в системе ANSYS. Модель позволяет учитывать все основные особенности конструкций и условий эксплуатации современных высокоскоростных шпиндельных узлов на подшипниках качения.

2. Сравнительный анализ показал, что относительная погрешность расчетных и экспериментальных значений температур на корпусе ШУ не превышает 10–12 %, что подтверждает адекватность модели и возможность ее применения для прогнозной оценки тепловых характеристик ШУ при проектировании и выборе их оптимальных параметров.

3. Тепловая модель и бесконтактный метод измерения температур ШУ могут совместно использоваться для дальнейшей оптимизации и идентификации ШУ при проектировании [7, 8].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зверев, И.А. Многокритериальное проектирование и исследование шпиндельных узлов: монография / И.А. Зверев. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2024. – 240 с.
2. Зверев, И.А. Исследование тепловых характеристик шпиндельных узлов на опорах качения / И.А. Зверев, А.Р. Маслов // Вестник машиностроения. – 2017. – № 1. – С. 36–39.
3. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 316 с.
4. Кузнецов, А.П. Тепловые процессы в металлорежущих станках / А.П. Кузнецов. – М.: Техносфера, 2019. – 489 с.
5. Леонтьев, А.И. Теория теплообмена / А.И. Леонтьев. – М.: Высшая школа, 1979. – 496 с.
6. Самохвалов, Е.И. Температурный анализ шпиндельных узлов токарных станков средних размеров / Е.И. Самохвалов, З.М. Левина // СТИН. – 1985. – № 11. – С. 17–19.
7. Zverev, I.A. Multicriteria optimization of the machine tools and their units / I.A. Zverev; in the book: Statnikov R.B., Matusov I.B. “Multicriteria design”. – London: Cluver Publishing Group, 1997. – Pp. 142–153.
8. Zverev, I.A. Vector identification of the spindle units / I.A. Zverev; in the book: Statnikov R.B., Matusov I.B. “Multicriteria design”. – London: Cluver Publishing Group, 1997. – Pp. 117–125.

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО МЕТОДА КРЕПЛЕНИЯ СМЕННЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН К КОРПУСУ ПРОТЯЖКИ

Копьяк Д.Г., аспирант

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

Данное исследование посвящено разработке и испытаниям протяжки со сменными твердосплавными пластинами для обработки жаропрочных сплавов. Инновационный механизм зажима повышает жесткость инструмента и упрощает техническое обслуживание за счет исключения пайки и повторной шлифовки. Результаты экспериментов подтверждают эффективность инструмента в достижении высокой шероховатости поверхности и точности размеров. Система винтового крепления обеспечивает повышенную долговечность, экономичность и гибкость в эксплуатации, что делает ее перспективным решением для сложных задач механической обработки в аэрокосмической промышленности и высокоточном производстве.

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

CHOOSING A RATIONAL METHOD OF ATTACHING REPLACEABLE CARBIDE PLATES TO THE BROACH BODY

Kopyak D.G., PhD student

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

This study is devoted to the development and testing of a broach with screw-on replaceable carbide inserts for machining heat-resistant alloys. The innovative clamping mechanism increases tool rigidity and simplifies maintenance by eliminating soldering and regrinding. The experimental results confirm the effectiveness of the tool in achieving high surface roughness and dimensional accuracy. The screw-on clamping system provides increased durability, cost-effectiveness, and operational flexibility, making it a promising solution for complex machining tasks in the aerospace and high-precision manufacturing industries.

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

Повышение производительности и надёжности технологического оборудования при сохранении высокого качества выпускаемой продукции является одной из основных задач современного машиностроительного производства. Однако исходя из производственного опыта можно сказать, что узким местом является инструментальное обеспечение, поскольку добиться высокой точности за счёт применения универсальных режущих инструментов оказалось весьма трудно даже при использовании высокоточного оборудования. Особенно это актуально для деталей из титановых, жаропрочных и высоколегированных сплавов.

В этой связи появилась необходимость разработки более сложного и эффективного инструмента. Одним из таких инструментов выступает протяжка – многозубый режущий инструмент, позволяющий обрабатывать внутренние и наружные поверхности почти любой конфигурации.

В современном машиностроении протягивание недостаточно распространено из-за отсутствия научно обоснованных методик проектирования, трудности разработки которых связаны с рядом особенностей процесса резания при протягивании. К таким особенностям следует отнести [2]:

1. Постепенное удаление технологического припуска большим числом зубьев инструмента, формирующим тонкие широкие слои материала. Данный подход требует высокой точности изготовления и повышенной жесткости инструмента.

2. Ограниченные скорости обработки: до 15–18 м/мин для оборудования малой и средней мощности и 6–8 м/мин для высокомоощных станков.

3. Отсутствие возможности регулирования подачи за счёт кинематического движения станка. Толщина снимаемого слоя регулируется разницей высотного положения зубьев инструмента – каждый последующий режущий зуб выступает над предыдущим.

4. Способность выполнять за один ход комбинированную обработку, объединяющую черновое резание, чистовую доводку, выглаживание и поверхностное упрочнение детали.

Недостаточный учет указанных особенностей приводит при протягивании в деталях из труднообрабатываемых материалов к возникновению ряда дефектов: несоответствие геометрических параметров обработанной поверхности требованиям конструкторской документации, сколы на зубьях протяжки, быстрый выход инструмента из строя.

Кроме того, к указанным особенностям добавляются недостатки, характерные для протяжного инструмента с напайными пластинами [3, 4]: возникновение трещин в пластинах во время напайки и заточки, неравномерная заточка зубьев протяжки, неравномерный износ зубьев в процессе обработки, необходимость замены протяжки при разрушении одного-двух зубьев, невозможность повторного использования корпуса протяжки и др.

Альтернативой протяжному инструменту с напайными пластинами является протяжной инструмент с механическим креплением сменных твердосплавных пластин, который обладает рядом преимуществ [3]:

- увеличение срока службы корпуса протяжки;
- унификация и взаимозаменяемость составных элементов;
- исключение из производственного процесса трудоёмких операций пайки и заточки;
- формирование стружки требуемой формы и размера;
- возможность увеличения показателей режимов резания при сохранении качества обрабатываемой поверхности.

Однако применение сменных твердосплавных имеет некоторые недостатки:

- уменьшение жёсткости системы;
- дороговизна;
- сложность изготовления.

Был проведен анализ схем крепления твердосплавных пластин на корпусах других режущих инструментов сборных конструкций. Основными способами закрепления режущих пластин являются: крепление прихватом сверху (обозначается символом С), крепление пластины сверху и поджим её за отверстие прихватом (D), крепление прихватом сверху и через отверстие (M), крепление через отверстие подвижным штифтом (P) и крепление винтом через отверстие (S).

На рис. 1 представлены схемы крепления СМП к корпусу токарного резца.

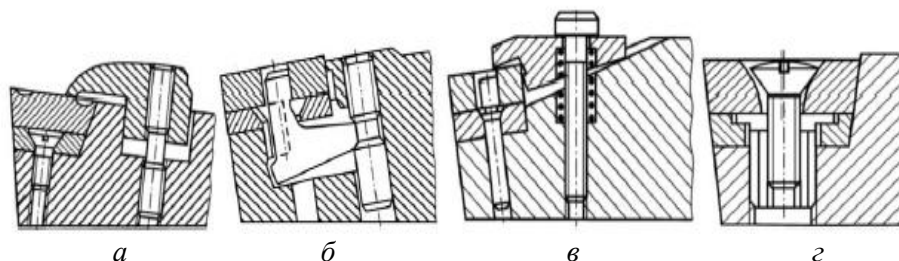


Рис. 1. Различные схемы крепления твердосплавных пластин на токарных державках:

- а* – схема зажима прихватом;
- б* – с помощью углового рычага и пластины прямоугольного сечения через отверстие отверстием;
- в* – по двум поверхностям пластинки;
- г* – крепление твердосплавной пластины с помощью винта

При расчете конструкции протяжки со сменными пластинами было принято решение применять схему крепления твердосплавной пластины с помощью винта (см. рис. 1, 2) в связи с простотой реализации в конструкции сборной протяжки.

Головка винта и отверстие режущей пластины имеют конусную форму, при этом ось винта несколько смещена в сторону опорных стенок гнезда. При завинчивании винта режущая пластина прижимается одновременно к боковым стенкам и опорной поверхности гнезда державки.



Рис. 2. Протяжка со сменными пластинами

Ключевым аспектом данной системы является смещение оси винта относительно центральной линии гнезда державки. Ось крепёжного элемента смещена радиально в сторону опорных стенок гнезда. Такая асимметрия создаёт момент силы при затяжке винта, что приводит к двойному прижатию пластины: радиальное (к боковым стенкам) и осевое (к опорной поверхности гнезда).

Был проведен расчёт параметров узла крепления СМП к корпусу протяжки по известным методикам [5, 6], спроектирована и изготовлена протяжка со сменными твердосплавными пластинами SNEC1254ZZEN HCS35X, имеющими ширину режущей части 5,4 мм (см. рис. 2), для обработки паза, показанного на рис. 3.

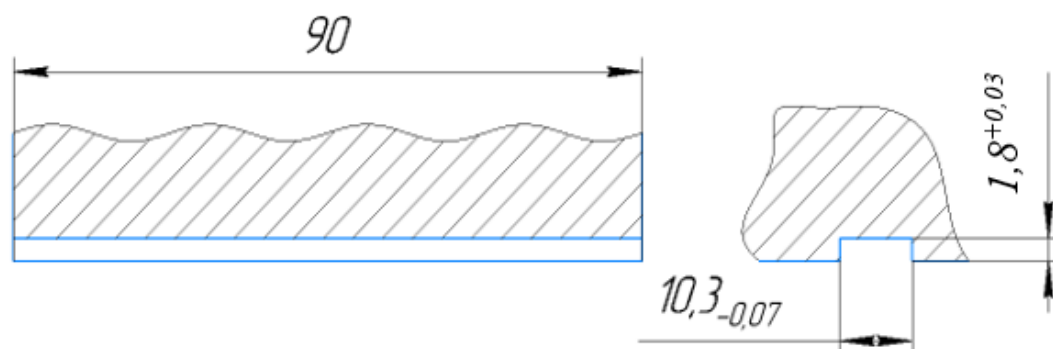


Рис. 3. Эскиз обрабатываемого паза

Обрабатываемый материал – сталь ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693-ВД) – жаропрочный сплав на никелевой основе, применяемый для изготовления деталей, работающих при высоких температурах.

Припуски на черновую, получистовую и чистовую обработку составили соответственно 1,4; 0,3 и 0,1 мм. Крепление пластин осуществлялось винтами М4. Общее число зубьев протяжки – 15 при длине режущего блока 660 мм.

Скорость резания примем 7,8 м/мин.

Поскольку материал детали принадлежит к группе жаропрочных материалов и, соответственно, является труднообрабатываемым, примем скорость резания равной 7,8 м/мин, а значения переднего угла $\gamma = 6^\circ$ и заднего $\alpha = 5^\circ$.

Затем рассчитаем силу резания P_z [3]:

$$P_z = \frac{60S_Z^{0,55} \delta^{0,8} h^{0,06}}{V^{0,15}} ;$$

$$P_{z \text{ черн}} = \frac{60 \cdot 0,16^{0,55} \cdot 79^{0,8} \cdot 0,002^{0,06}}{7,8^{0,15}} = 528,4 \text{ H};$$

$$P_{z \text{ н-ч}} = \frac{60 \cdot 0,1^{0,55} \cdot 79^{0,8} \cdot 0,002^{0,06}}{7,8^{0,15}} = 417,8 \text{ H};$$

$$P_{z \text{ чист}} = \frac{60 \cdot 0,04^{0,55} \cdot 79^{0,8} \cdot 0,002^{0,06}}{7,8^{0,15}} = 295,1 \text{ H}.$$
(1)

Теперь рассчитаем радиальную силу резания P_y :

$$P_y = 0,1 \cdot P_z$$

$$P_{y \text{ черн}} = 0,1 \cdot P_{z \text{ черн}} = 0,1 \cdot 528,4 = 52,84 \text{ H};$$

$$P_{y \text{ н-ч}} = 0,1 \cdot P_{z \text{ н-ч}} = 0,1 \cdot 417,8 = 41,78 \text{ H};$$

$$P_{y \text{ чист}} = 0,1 \cdot P_{z \text{ н-ч}} = 0,1 \cdot 295,1 = 29,51 \text{ H}.$$
(2)

Рассчитаем момент изгиба $M_{изг}$:

$$M_{изг} = P_z \cdot l \sin \alpha,$$
(3)

где l – плечо силы, мм.

В этом расчёте плечо l будет равно $B_{пл}/2$, где $B_{пл}$ – ширина режущей пластины, мм. Тогда формула (2) для расчета момента изгиба примет вид

$$M_{изг} = \frac{P_z \cdot B_{пл}}{2 \cdot \sin \alpha};$$

$$M_{изг \text{ черн}} = \frac{P_z \cdot B_{пл}}{2 \cdot \sin \alpha} = \frac{528,4 \cdot 5,4}{2 \cdot 0,087} = 124,12 \text{ H/мм};$$

$$M_{изг \text{ н-ч}} = \frac{P_z \cdot B_{пл}}{2 \cdot \sin \alpha} = \frac{417,8 \cdot 5,4}{2 \cdot 0,087} = 98,14 \text{ H/мм};$$

$$M_{изг \text{ чист}} = \frac{P_z \cdot B_{пл}}{2 \cdot \sin \alpha} = \frac{295,1 \cdot 5,4}{2 \cdot 0,087} = 69,32 \text{ H/мм}.$$
(4)

Поскольку в данной протяжке используются сменные многогранные пластины, они будут крепиться к корпусу при помощи винтов. Следовательно, требуется рассчитать нагрузку на узлы крепления, усилие зажима и провести расчёт крепежного винта.

Начнём с расчёта нагрузки на узлы крепления ΣP . Максимальные нагрузки будут наблюдаться при черновом протягивании, поэтому произведём расчёт с параметрами черновой обработки:

$$\Sigma P = P_z + P_y + M_{изг} = 528,4 + 52,84 + 124,12 = 705,36 \text{ H}.$$
(5)

Зная максимальную нагрузку, мы можем рассчитать необходимое усилие зажима:

$$P_{\text{усил}} = k \cdot \sum P = 1,5 \cdot 705,36 = 1058 \text{ Н.} \quad (6)$$

Теперь проведём расчёт крепёжного винта под крепление пластины. Для начала считаем диаметр винта d :

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_p}{\pi \cdot [\sigma_p]}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3056}{3,14 \cdot 800}} = 2,2 \text{ мм;} \quad (7)$$

$[\sigma_p]$ – допустимое напряжение растяжения, 800 МПа;
 Q_p – усилие затягивания, которое действует на винт, Н.

$$Q = \frac{Kt \cdot \sum P}{f \cdot z \cdot i} = \frac{1,3 \cdot 705,36}{0,3 \cdot 1 \cdot 1} = 3056 \text{ Н.} \quad (8)$$

Расчётный диаметр $d_1 = 2,2$ мм округлим в большую сторону и примем диаметр равным 4 мм. Теперь проведём расчёт резьбы в стыке. Для начала определим диаметр винта на смятие

$$[\sigma_{\text{см}}] = \frac{\sum P}{d \cdot S}, \quad (9)$$

где $[\sigma_{\text{см}}]$ – допустимое напряжение на смятие: $[\sigma_{\text{см}}] = 0,8\sigma_T = 0,8 \cdot 300 = 240$ МПа.

$$d \geq \frac{\sum P}{\delta \cdot [\sigma_{\text{см}}]} = \frac{705,36}{10 \cdot 240} = \frac{705,36}{2400} = 0,29 \text{ мм.} \quad (10)$$

Принимаем диаметр винта равным 4 мм, что больше, чем 0,29 мм, следовательно, условие выполняется.

Далее определим диаметр винта из расчёта на срез:

$$D \geq \sqrt{\frac{4 \cdot \sum P}{\pi \cdot [t_{\text{ср}}] \cdot i}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 705,36}{3,14 \cdot 120 \cdot 1}} = \sqrt{\frac{2821}{376,8}} = \sqrt{7,5} = 2,73 \text{ мм.} \quad (11)$$

Принятый ранее диаметр винта 4 мм $> 2,73$ мм, следовательно, условие выполняется.

Исходя из полученных данных выбираем винт М4 табличным способом согласно ГОСТ.

Были проведены испытания изготовленной протяжки. Протягивание происходило со скоростью резания 7,8 м/мин. Было протянуто 2 паз. На протянутых пазах удалось добиться требуемой шероховатости R_a 1,6 мкм. Размеры обработанных пазов составили: паз № 1 – глубина 1,806 мм и ширина 10,324 мм; паз № 2 – глубина 2,035 мм и ширина 10,333 мм.

Таким образом, испытание опытной конструкции протяжки показало, что использование винтового крепления сменных твердосплавных пластин является рациональным методом крепления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гатиев, М.Ш. Особенности процесса формообразования отверстия процессом протягивания в труднообрабатываемых материалах / М.Ш. Гатиев, М.С. Мержоева, С.А. Чевычелов // Наука и бизнес: пути развития. – 2021. – № 3 (117). – С. 8–11.
2. Макаров, В.Ф. Исследование и разработка опытных конструкций сборных протяжек с неплетачиваемыми твердосплавными пластинами / В.Ф. Макаров, А.С. Приступов // Вестник

- Пермского государственного технического университета. Серия Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 28–34.
3. Макаров, В.Ф. Выбор и назначение оптимальных условий протягивания заготовок из труднообрабатываемых материалов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 396 с.
 4. Макаров, В.Ф. Повышение эффективности процесса скоростного протягивания на основе проектирования, расчета и оптимизации параметров сборных протяжек / В.Ф. Макаров, Г.Д. Петухов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 9 (204). – С. 44–47.
 5. Маргулис, Д.К. Протяжки для обработки отверстий / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин и др. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 229.
 6. Пронкин, Н.Ф. Протягивание труднообрабатываемых материалов / Н.Ф. Пронкин. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 119.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА ПУТЕМ ПОСТРОЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ДЕЙСТВИЯ

Ладыгин Р.В., аспирант

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

Рассматривается возможность нейросетевого моделирования как эксплуатационных характеристик шпиндельного узла, так и его конструктивных параметров. Показаны примеры нейронных сетей для таких видов моделирования, дан их математический анализ и приведены практические примеры их работы.

Ключевые слова: нейросетевое моделирование, шпиндельный узел, эксплуатационные свойства, конструктивные параметры

PREDICTION OF OPERATIONAL PROPERTIES AND DESIGN PARAMETERS OF THE SPINDLE UNIT BY CONSTRUCTING A DIRECT AND INVERSE NEURAL NETWORK

Ladyagin R.V., PhD student

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

The article considers the possibility of neural network modeling of both the operational characteristics of the spindle unit and its design parameters. Examples of neural networks for such types of modeling are shown, their mathematical analysis is given, and practical examples of their operation are given.

Keywords: neural network modeling, operational properties, design parameters, spindle unit

Шпиндельный узел (ШУ) – один из наиболее ответственных узлов станка, на долю которого приходится 50–80 % погрешностей в общем балансе точности станка [1]. На ШУ действует большое количество как внешних, так и внутренних факторов, и не всегда это действие одновременное. При этом каждый из факторов является функцией ряда переменных или же случайной величиной. Из указанного следует, что наиболее полным подходом при оценке точности и параметрической надежности должен выступать вероятностный подход.

Нейронные сети (НС) – это инструмент, наилучшим образом реализующий предложенный подход. Есть несколько ключевых аспектов, в которых нейросетевые технологии могут оказать свою помощь [2, 3]:

1. Обработка больших данных. Современные нейросети обладают высокой способностью к обработке и анализу больших объемов данных. Сбор данных о работе ШУ во времени позволяет нейросетям находить скрытые зависимости и корреляции.

2. Моделирование сложных взаимодействий. Шпиндельный узел подвержен влиянию множества факторов, и их взаимодействие может быть нелинейным и сложным. Нейросети способны моделировать такие сложные системы, создавая высокоточные предсказания на основе комбинированных входных данных. Это позволяет получать более точные результаты, чем традиционные методы, основанные на линейной регрессии или других простых моделях.

3. Вероятностные модели. Используя архитектуры нейросетей, такие как Bayesian Neural Networks или Variational Autoencoders, можно интегрировать вероятностные методы в прогнозировании. Это дает возможность оценивать неопределенности в предсказаниях, а также их вероятностное распределение, что особенно важно при анализе факторов, которые могут быть зашумленными или неполными.

4. Автоматизация и адаптация. Нейросети могут адаптироваться при изменении условий работы шпиндельного узла. Например, новая информация о процессе может быть использована для дообучения сетей, что позволяет получить актуальные рекомендации и предсказания. Это делает систему более устойчивой к изменениям во внешней среде и внутренней динамике.

5. Оптимизация процессов. На основе анализа данных нейросети можно предложить оптимальные режимы работы шпиндельных узлов, что поможет минимизировать износ и повысить эффективность. С учетом различных факторов влияния можно создавать динамические модели для оптимизации работы оборудования в реальном времени.

Представленная работа ставит своей целью дать оценку возможности использования нейронных сетей для решения прямой и обратной задач проектирования ШУ: спрогнозировать эксплуатационные характеристики ШУ на этапе создания ШУ, с одной стороны, и определить его конструктивные параметры по необходимым эксплуатационным характеристикам – с другой.

Для достижения поставленной цели были проведены серии экспериментов на группе токарных станков: 1А616, 1К62, 16Б16КП, 400ХС «Вектор», 1И250В (аналог 250ИТВМ). Полученные экспериментальные данные использовались для обучения нейросети. Всего в ходе экспериментов зафиксировано 481 наблюдение, по которым определены 14 переменных: максимальный диаметр обрабатываемой детали (D_{max}); динамическая (C) и статическая (C_0) грузоподъемности подшипников передней опоры; номер конуса Морзе (kM); межопорное расстояние (λ) и вылет (α) шпинделя (Ш); координата расположения приводного элемента ($L1$), принятая от положения передней опоры; радиальный зазор подшипника передней опоры (S); частота вращения шпинделя (n); сила (P), имитирующая нагрузку в процессе резания от сил P_z и P_y ; время работы (t_m); избыточная температура передней опоры (T); биение шпинделя (Δ); упругое смещение переднего конца Ш (δ).

Построение НС осуществлялось в программе Statistica методом автоматического построения. Для каждой из задач строилось по 1000 сетей, из которых программой отбиралась одна наилучшая (по критериям производительности и ошибки обучения). На скрытом и выходном слоях нейросети использовались линейная, гиперболическая, логистическая и экспоненциальная функции активации нейронов.

При решении прямой задачи, т. е. моделировании эксплуатационных характеристик ШУ, использовались все 14 переменных. Полученная для неё нейросеть имеет архитектуру многослойного персептрона [2] MLP 11-39-3 с 39 нейронами скрытого слоя с функциями активации (ФА): логистической на скрытом слое; экспоненциальной на выходном. Проведенный математический анализ нейросети дал весьма высокие коэффициенты корреляции для тестовой выборки переменных выходного слоя, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции для сети MLP 11-39-3

| 1.MLP 11-39-3 | δ (Test) | Δ (Test) | T (Test) |
|---------------|-----------------|-----------------|------------|
| | 0,992711 | 0,978617 | 0,995939 |

При проверке данной нейросети на контрольном примере, в ходе которого в построенную сеть загружается файл, содержащий данные, подобные экспериментальным, либо сами экспериментальные данные, используемые ранее в процессе её обучения, и по которому можно определить качество прогноза, получены низкие средние относительные ошибки по выходным переменным (табл. 2).

Таблица 2

Средние относительные ошибки для выходных переменных сети MLP 11-39-3, %

| 1.MLP 11-39-3 | δ | Δ | T |
|---------------|----------|----------|-----|
| | 10,8 | 7,9 | 1,8 |

Моделирование при помощи нейросети MLP 11-39-3 эксплуатационных характеристик по различным станкам представлено в табл. 3. Составляющие (переменные) входного слоя $D_{\max} \dots P$ расположены в правой части таблицы и отображают полученные экспериментальные данные, а выходного слоя $1.\delta(t)-1.T(t)$ представлены в левой части таблицы и имеют маркировку – 1.«переменная»(t). Первая строчка содержит характеристики ШУ станка 1А616, вторая – станка 1К62 и третья – 1И250В.

Таблица 3

Пользовательские прогнозы нейросети MLP 11-39-3

| № | Custom predictions spreadsheet (3_Experiment_ALL_481_bm) | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---------------|----------|------------|------|-----|-------|------|----------|-----------|------|------|------|------|
| | $1.\delta(t)$ | $1.\Delta(t)$ | $1.T(t)$ | D_{\max} | kM | C | C_0 | $L1$ | α | λ | S | n | tm | P |
| 1 | 13,5 | 6,27 | 28,7 | 320 | 5 | 122 | 91 | 213 | 117 | 518 | 3,0 | 280 | 30 | 2500 |
| 2 | 21,4 | 7,79 | 38,0 | 400 | 6 | 160 | 129 | 257 | 110 | 654 | 4,75 | 1250 | 150 | 5600 |
| 3 | 9,8 | 1,42 | 35,8 | 240 | 4 | 75 | 54 | 310 | 78 | 215 | 0,75 | 980 | 15 | 1800 |
| 4 | 11,4 | 7,57 | 60,8 | 320 | 5 | 122 | 91 | 213 | 117 | 518 | 3,0 | 2500 | 30 | 2500 |
| 5 | 40,5 | 2,84 | 37,4 | 400 | 6 | 160 | 129 | 257 | 110 | 400 | 4,75 | 1250 | 150 | 5600 |
| 6 | 24,2 | 1,46 | 35,3 | 240 | 4 | 75 | 54 | 310 | 78 | 215 | 0,75 | 980 | 15 | 3600 |
| 7 | 8,0 | 3,55 | 32,0 | 240 | 5 | 122 | 91 | 310 | 78 | 215 | 0,75 | 980 | 15 | 3600 |

Хорошо видно, как выходные переменные принимают значения, адекватно реагируя на изменение входных характеристик. Выходные переменные спрогнозированы нейросетью с точностью, указанной в табл. 2.

Изменим входные значения. Сравнение будет происходить построчно: 1–4, 2–5, 3–6, 6–7 и 3–7.

У ШУ станка 1А616 сравнительно небольшая максимальная частота вращения (1800 об/мин), а в строчке 1 она равна 280 об/мин (наименьшая частота, идущая на шпиндель «напрямую» без перебора). Поднимем максимальную частоту, задав её значение в 2500 об/мин, и спрогнозируем полученные характеристики. Видно, что при таком режиме температура поднялась с 28,7 до 60,8 °С, что отображает воздействие резко увеличившегося момента трения (строчки 1–4).

ШУ станка 1К62 отличается довольно большими габаритами. Снизим межопорное расстояние с 654 до 400 мм, уменьшив тем самым его габариты в 1,6 раза. Значение упругого смещения переднего конца Ш $1.\delta(t)$ резко отреагировало на такое изменение. Величина смещения возросла с 21,4 до 40,5 мкм, т. е. почти в 2 раза (строчки 2–5).

Станок 1И250В – станок высокой точности и предназначен для получистовых и чистовых операций [4]. Воздействие больших сил резания на нём недопустимо. Увеличим имитирующую силу резания в 2 раза – с 1800 до 3600 Н. Переменная $1.\delta(t)$ отреагировала на изменившуюся силу более чем в 2 раза, увеличив своё значение с 9,8 до 24,2 мкм (строчки 3–6).

Теперь установим в ШУ станка 1И250В шпиндель с большими диаметральными размерами под конус Морзе 5 и соответственно разместим его на подшипниках большей грузоподъёмности (от 1А616) (строчки 6–7). При такой постановке значение переменной $1.\delta(t)$ уменьшилось в 3 раза (с 24,2 до 8 мкм) и стало даже меньше исходной (9,8 мкм) (строчки 3–7). Увеличилось значение биения, которое стало соответствовать ШУ станка 1А616 (3,55 мкм).

Из приведенных примеров видно, что созданная нейросеть для моделирования эксплуатационных характеристик ШУ адекватно реагирует на изменение входных параметров.

Проведем анализ решения обратной задачи, т. е. прогнозирование конструктивных параметров, аналогично тому, как это было сделано для прямой задачи.

Полученная сеть имеет архитектуру MLP 4-20-8 с гиперболической ФА на скрытом слое и логистической на выходном. За исключением переменной S , имеющей высокую корреляцию (0,86), все остальные переменные имеют весьма высокую корреляцию (табл. 4).

Коэффициенты корреляции для сети MLP 4-20-8

| | Correlation coefficients (3_Experiment_ALL_481_bm) | | | | | | | |
|--------------|--|----------------|------------|--------------|-------------|-----------------|------------------|------------|
| | D_{\max} (Test) | kM (Test) | C (Test) | C_o (Test) | $L1$ (Test) | α (Test) | λ (Test) | S (Test) |
| 1.MLP 4-20-8 | 0,948504 | 0,963963 | 0,994214 | 0,998744 | 0,990676 | 0,988243 | 0,981055 | 0,865426 |

За исключением все той же переменной S средние относительные ошибки по выходным переменным весьма малы (табл. 5).

Таблица 5

Средние относительные ошибки для выходных переменных сети MLP 4-20-8

| | Средняя относительная ошибка, % | | | | | | | |
|--------------|---------------------------------|-----------|----------|------|-------|-----|------|------------|
| | S | λ | α | $L1$ | C_0 | C | kM | D_{\max} |
| 1.MLP 4-20-8 | 78 | 3,2 | 0,7 | 2,5 | 3,3 | 2,4 | 1,2 | 1,9 |

Состав переменных для нейросети обратного действия не зеркален сети прямого действия (маркировка 1.«переменная» (t) – выходные переменные, остальные – входные).

Из расчета исключены: время работы (t_m); избыточная температура передней опоры (T), сведения о которых излишние и не требуют их учета при проектировании конструкции ШУ.

Смоделируем условно 3 вида обработки (табл. 6): 1 – (строчка) черновая; 2 – получистовая; 3 – чистовая, и сравним полученные строчки между собой. Зададимся при этом точностными параметрами (δ , Δ), силовыми (P) и скоростными (n).

По выходу НС видно, что она «старается подобрать» под каждый режим «свой» станок, то есть найти готовое решение. Подбор производится исходя из экспериментальных данных, которые являлись обучающей выборкой и которые получены с конкретных станков. Здесь за 1-й строчкой скрывается конструкция ШУ станка мод. 1К62, за 3-й – мод. 1И250В. Если готовое решение отсутствует, она предлагает свой вариант: 2 строчка – это абстрактная конструкция.

Несколько изменим заданные режимы и параметры. Сравнение будем проводить построчно: 1–4, 2–5, 3–6 и 6–7. Поднимем нагрузку на ШУ станка мод. 1К62 с 5500 до 7000 Н. Теперь для такой нагрузки НС предлагает использовать конструкцию ШУ от мод. 16Б16КП, при этом несколько «смешав» параметры, влияющие на грузоподъемность двух этих станков, и уменьшить радиальный зазор (S), поскольку чем составляющая S меньше, тем меньше будет и (δ) – упругое смещение переднего конца шпинделя [5] (строчки 1–4).

Таблица 6

Пользовательские прогнозы нейросети MLP 4-20-8

| Cases | Custom predictions spreadsheet (3_Experiment_ALL_481_bm) | | | | | | | | | | | |
|-------|--|-----------|----------|------------|-----------|---------------|----------------|----------|----------|----------|------|------|
| | $1.D_{\max}(t)$ | $1.KM(t)$ | $1.C(t)$ | $1.C_o(t)$ | $1.L1(t)$ | $1.\alpha(t)$ | $1.\lambda(t)$ | $1.S(t)$ | δ | Δ | P | n |
| 1 | 396 | 6 | 162 | 130 | 260 | 110 | 639 | 5,41 | 20 | 8 | 5500 | 700 |
| 2 | 325 | 6 | 206 | 208 | 292 | 122 | 497 | 0,26 | 12 | 5 | 3000 | 1400 |
| 3 | 240 | 4 | 75 | 54 | 352 | 78 | 215 | 0,25 | 5 | 2 | 800 | 2100 |
| 4 | 299 | 6 | 160 | 439 | 460 | 126 | 473 | 0,25 | 20 | 8 | 7000 | 700 |
| 5 | 358 | 6 | 273 | 446 | 460 | 126 | 324 | 0,25 | 5 | 2 | 3000 | 1400 |
| 6 | 240 | 4 | 75 | 54 | 219 | 78 | 215 | 5,50 | 5 | 2 | 800 | 3000 |
| 7 | 240 | 4 | 75 | 54 | 454 | 78 | 215 | 5,50 | 2 | 1 | 800 | 3000 |

Зададимся повышенными требованиями точности к абстрактной конструкции ШУ, снизив допустимые упругие смещения с 20 до 12 мкм, а биение – с 12 до 5 мкм. На выходе НС предложила конструкцию ШУ станка мод. 16Б16КП, в частности, обладающего подшипниками большей грузоподъемности (строчка 2–5).

Увеличим частоту вращения Ш на мод. 1И250В с 2100 до 3000 об/мин. НС при этом предлагает ту же конструкцию ШУ, только с увеличенным значением S – с 0,25 до 5,5 мкм для компенсации возросшего влияния момента трения (строчка 3–6).

И в заключение зададим повышенные требования к точности в строчке 7 относительно строчки 6. За исключением параметра $L1$ НС предлагает все ту же конструкцию ШУ. И это объясняется тем, что на станке мод. 1И250В получены самые малые значения δ и Δ за всю серию экспериментов.

Выход НС по обратной задаче получается несколько укрупненный и носит черты кластерного характера. Для того чтобы добиться более гибкого изменения её выходных параметров, требуется обучить сеть на более широком диапазоне варьируемых значений параметров конструкции. Ведь сеть для прямой задачи обучалась на десятках значений каждого показателя, в то время как сеть для обратной – только на 5 значениях для каждого параметра, отражающих конструкцию ШУ конкретного станка. Подобное обучение возможно на основе данных, полученных в результате моделирования конструкции как в среде конечно-элементного анализа ANSYS, так и НС для прямой задачи, эффективность которой по пользовательским прогнозам показана в данной работе.

Можно резюмировать, что НС не только прогнозирует эксплуатационные характеристики ШУ, но также способна предсказывать и его конструктивные параметры, тем самым доказана её работоспособность в двух направлениях: для прямой и обратной задач конструирования ШУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пуш, А.В. Шпиндельные узлы: Качество и надежность / А.В. Пуш. – М.: Машиностроение, 1992. – 287 с.
2. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
3. Искусственный интеллект, интернет вещей, облачные технологии и цифровые двойники в современном механообрабатывающем производстве: монография / Ю.Г. Кабалдин [и др.]; под ред. Ю.Г. Кабалдина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. – 196 с.
4. Станок токарно-винторезный модели 250ИТВМ.01, 250ИТВМ.03, 250ИТВМФ1 Руководство по эксплуатации. Часть 1 250ИТВМ.00.000 РЭ. 2000.
5. Денисенко, А.Ф. Нейросетевое обоснование выбора регулируемых параметров при сборке шпиндельного узла / А.Ф. Денисенко, Р.В. Ладыгин // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – № 14. – С. 25–29. – DOI: 10.26160/2541-8637-2024-14-25-29.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Малкина И.В., старший преподаватель

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

При изготовлении различных деталей, работающих в сборочных узлах изделий машиностроения, большое значение имеет точное соблюдение геометрических параметров всех составляющих. В данной работе описан оптический метод контроля качества детали «вал-шестерня». Представлена структурная схема информационно-измерительной системы. Выбрано измерительное оборудование, обладающее необходимыми критериями точности измерения.

Ключевые слова: геометрия изделия, методы контроля, точность измерений, автоматизация измерений, информационно-измерительная система, метрологическое обеспечение, оптические методы контроля

THE USE OF OPTICAL QUALITY CONTROL METHODS IN THE MANUFACTURE OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTS

Malkina I.V., senior lecturer

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

In the manufacture of various parts working in the assembly units of mechanical engineering products, precise observance of the geometric parameters of all components is of great importance. This paper describes an optical method for quality control of a shaft-gear part. A block diagram of the information and measurement system is presented. Measuring equipment has been selected that has the necessary measurement accuracy criteria.

Keywords: product geometry, control methods, measurement accuracy, measurement automation, information and measurement system, metrological support, optical control methods

При изготовлении сложных сборочных узлов изделий машиностроения большое внимание уделяется соблюдению требования совместимости работы всех составляющих. Практически всегда данные конструкции работают под большой нагрузкой, испытывают давление, трение, ударные и вибрационные возмущения. Следовательно, к качеству изготовления данных конструкций предъявляются повышенные требования.

Механические неавтоматизированные средства измерения уже не отвечают современным требованиям точности, требуют существенных затрат времени и трудочасов персонала. Введение в измерительный процесс современного автоматизированного оборудования позволяет перейти от выборочного контроля к сплошному и при этом значительно сократить время проведения мерительных операций.

Объектом исследования данной работы является деталь типа «вал-шестерня», внешний вид данного изделия представлен на рис. 1.

Вал-шестерня – это комплексная деталь, одновременно состоящая из вала и шестерни, слитых воедино. Предназначена данная деталь для передачи крутящего момента путем вращения и зацепления с зубьями другого вала. Используется данное изделие при больших нагрузках, и монолитное исполнение значительно повышает надежность такого элемента, поэтому в современном машиностроении это наиболее популярное исполнение, за исключением работы узла, где требуется одновременное движение шестерни по валу в процессе работы механизма.

Устанавливаемые на чертежах величины предельных отклонений реализуются предприятием-изготовителем на основе ГОСТ 30893.1-2002 и СТП-37.101.9677-88.

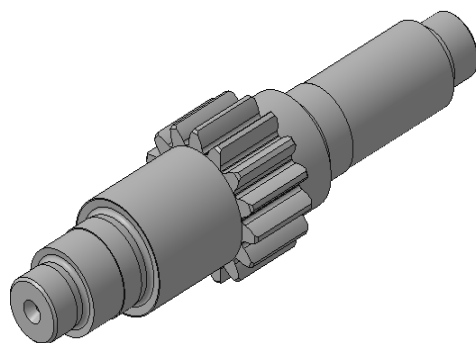


Рис. 1. Вал-шестерня

Геометрические параметры изделия типа «вал-шестерня», подлежащие контролю, включают линейные размеры, наружные диаметры, толщину зуба шестерни, а также радиальные биения.

Проведя анализ возможных методов (рис. 2) и средств измерения и контроля, можно с уверенностью сказать, что для контроля 2D-геометрии оптико-электронные системы контроля с использованием технического зрения наиболее предпочтительны. 3D-моделирование достаточно дорогостоящее и зачастую не требуется для обеспечения качественного контроля изделия. Оптико-электронные системы контроля основаны на использовании таких физических эффектов, как дифракция света, поглощение и поляризация. Технология контроля проста и эффективна.



Рис. 2. Методы оптического контроля геометрических параметров

Из всего многообразия представленного на рынке измерительной техники оборудования для реализации процесса автоматизации контроля качества изделия предлагается использование итальянской оптической измерительной системы VICIVISION.

Данное оборудование хорошо известно российским потребителям, внесено в Госреестр средств измерения, полностью подходит для реализации поставленных задач, так как предназначено для измерения и контроля геометрических параметров деталей любой степени сложности.

Системы оптического зрения VICIVISION являются оборудованием для производственных цеховых помещений и могут использоваться для массового сплошного контроля.

Если рассматривать структурную схему измерительной системы, то основными блоками являются:

- камера технического зрения, направленная на объект;
- преобразователь «свет – сигнал»;
- блоки первичной и вторичной обработки изображения;

- блок «память изображения»;
- блок визуального контроля;
- блок управления;
- контроллер связи с исполнительными механизмами;
- устройства записи и архивации информации.

Преимуществом данного оборудования является высокая производительность и точность измерений, полная автоматизация измерительного процесса с выводом полученной информации на дисплей оператора, сокращение трудовых ресурсов, большая номенклатура контролируемых параметров (углы между поверхностями, диаметры, радиусы, линейные размеры, симметричность, параллельность и перпендикулярность и т. д.). Внешний вид системы представлен на рис. 3 [1].



Рис. 3. Автоматические оптические измерительные системы VICIVISION

Методика измерений на данном оборудовании не требует специального подготовительного процесса и может выполняться оператором без специальной подготовки. Измеряемый объект размещается в измерительной зоне устройства с возможностью вращения вокруг своей оси. Считывание информации осуществляется по теневому пятну (теневому профилю изделия) оптическим блоком измерения с дальнейшим формированием отчёта на дисплее оператора в виде таблицы со значениями диапазона допусков (рис. 4).

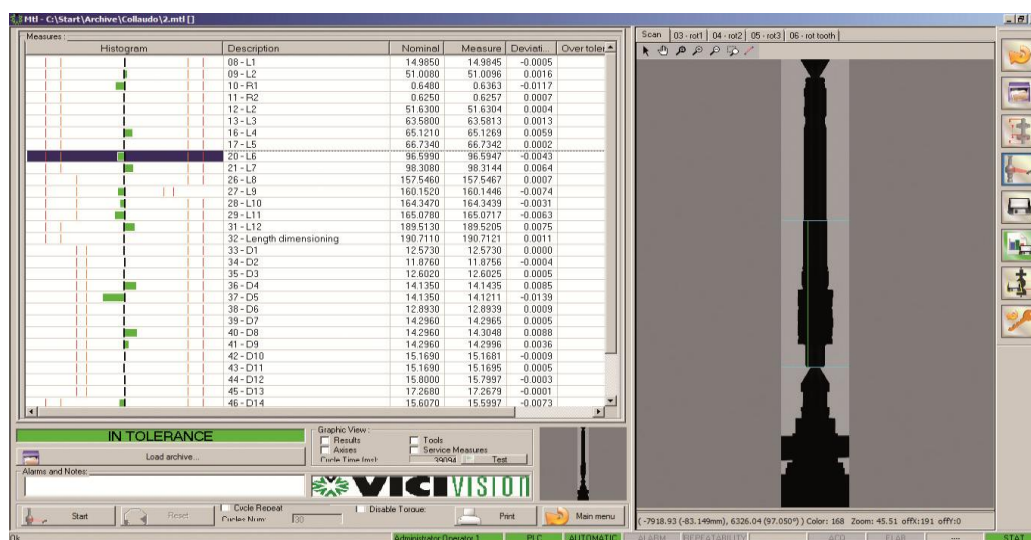


Рис. 4. Контур изделия в пределах допуска

Зелёный контур показывает значения, находящиеся в поле допуска, красный контур – отклонения от предельных значений. Наличие ясной картины по отклонению профиля дает оператору возможность своевременно влиять на работу обрабатывающего оборудования ещё на стадии предупреждения брака [2].

Программное обеспечение (ПО) позволяет осуществлять работу сразу нескольких единиц оборудования разного поколения, а также использовать различные виды визуализации отчёта: измерительная информация может быть представлена в виде графиков и гистограмм [2,3]. Все данные измерительного процесса архивируются в цифровом виде, что удобно для дальнейшего интегрирования в документацию предприятия (рис. 5).

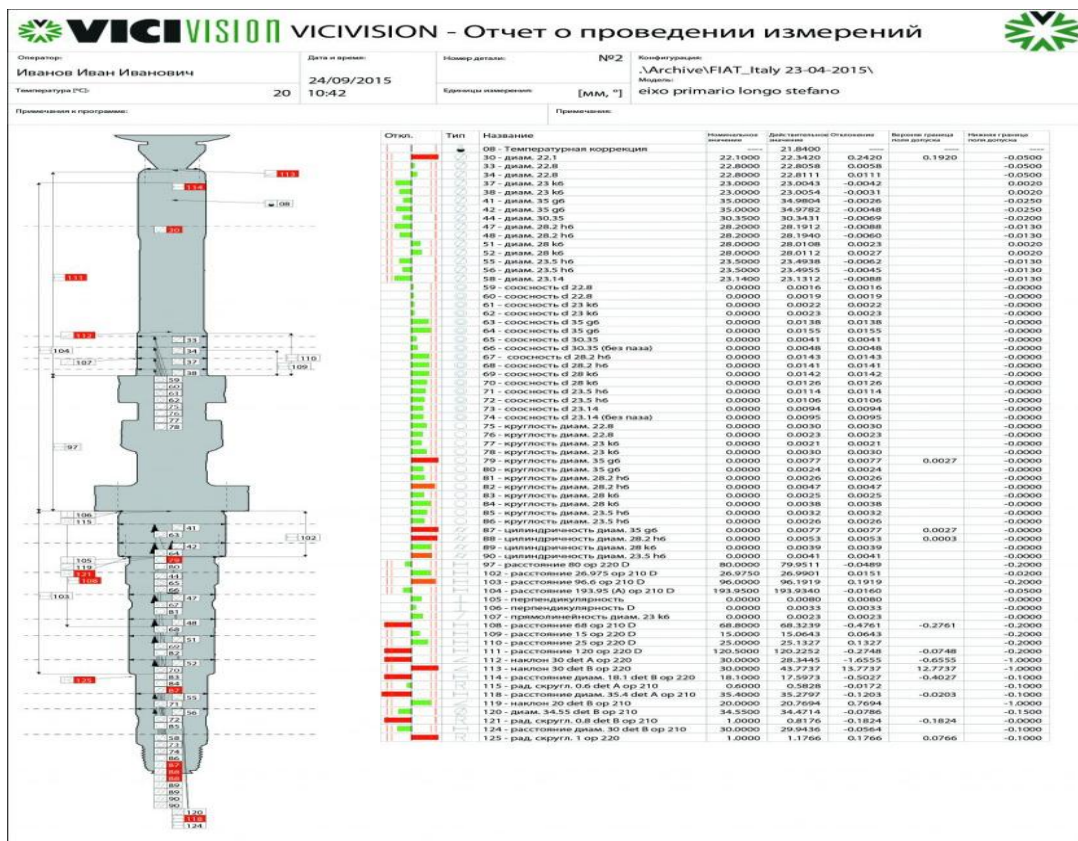


Рис. 5. Визуализация отчёта ПО VICIVISION

Проанализировав полученную информацию, можно сделать следующие выводы об основных преимуществах использования предлагаемого измерительного оборудования:

- простота в использовании и обслуживании;
- простое и удобное ПО;
- эффективный контроль значительной номенклатуры геометрических параметров благодаря высокому оптическому разрешению;
- легкая загрузка и выгрузка контролируемого изделия;
- исключение потери изделия при выпадении из держателей;
- высокое быстродействие (менее 60 с на единицу);
- хорошая точность измерений (погрешность менее 2 мкм);
- практически полная автоматизация измерительного процесса.

Представленная информационно-измерительная система использует удобный бесконтактный метод измерения, является универсальной, что в дальнейшем позволяет модернизировать или перепрофилировать производство без замены измерительного оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Многофункциональные оптические машины для контроля и измерения тел вращения VICIVISION [Электронный ресурс]. – URL: https://www.equipnet.ru/equip/equip_73605.html
2. Автоматические оптические измерительные системы VICIVISION [Электронный ресурс]. – URL: <https://pvp-snk.ru/vicivision?ysclid=m6w8ykzq1t957799134>
3. Многофункциональные оптические машины для контроля и измерения тел вращения от Итальянского производителя VICIVISION [Электронный ресурс]. – URL: <https://vicivision.kim96.ru>

ВЛИЯНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ РОЛИКОВ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДШИПНИКА

Носенко В.А.¹, д.т.н., профессор, **Зуев А.В.**², главный специалист,
Светличная В.Б.¹, к.т.н., доцент

¹ ВПИ (филиал) ВолгГТУ, г. Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация

² ОАО «УК ЕПК», г. Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация

E-mail: a.zuev@epkgroup.ru

Приведены результаты исследования сферической поверхности ролика подшипника, показаны особенности обработки с изменением состояния рабочей поверхности сборного шлифовального круга. Определены микрогеометрические параметры обработанной поверхности сферической поверхности ролика, показано их влияние на акустические свойства подшипника. Представлены закономерности изменения профиля рабочей поверхности составляющих сборного абразивного инструмента и обработанной поверхности сферы ролика.

Ключевые слова: подшипник, конический ролик, шлифование сферы, микрогеометрия, вибрации, звуковое давление

THE EFFECT OF MICROGEOMETRIC PARAMETERS OF THE SPHERICAL SURFACE OF TAPERED ROLLERS ON THE ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF THE BEARING

Nosenko V.A.¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Zuev A.V.**², Chief specialist,
Svetlichnaya V.B.¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ VPI (branch) VolgSTU, Volzhsky, Volgograd region, Russian Federation

² JSC "UK EPK", Volzhsky, Volgograd region, Russian Federation

E-mail: a.zuev@epkgroup.ru

The results of a study of the spherical surface of a bearing roller are presented, and the processing features with a change in the state of the working surface of a prefabricated grinding wheel are shown. The microgeometric parameters of the polished surface of the spherical roller surface are determined, and their effect on the acoustic properties of the bearing is shown. The patterns of changes in the profile of the working surface of the components of the assembled abrasive tool and the polished surface of the roller sphere are shown.

Keywords: bearing, tapered roller, sphere grinding, microgeometry, vibrations, sound pressure

Роликовые подшипники применяют в различных узлах автомобиля (ступицы, коробки передач, ведущие мосты), и качество их изготовления во многом определяет гарантийные сроки эксплуатации машины. Долговечность подшипника в значительной степени зависит от качества изготовления тел качения – роликов [1, 2]. Акустические параметры подшипников являются носителями динамических характеристик технического состояния изделия [3], а инструментальный метод контроля вибрации и звукового давления в процессе производства используется для комплексной оценки соответствия параметров подшипников требованиям конструкторской документации [4, 5]. Для определения источников повышенной вибрации конического роликового подшипника рассмотрены вибрации в трех полосах частот, что позволяет определить более узкий диапазон частот, в котором происходят наиболее значимые изменения вибрации [6].

Обработку торца ролика конического подшипника на ОАО «ЕПК Волжский» выполняют на сферошлифовальных станках-автоматах модели SХК-5А методом шлифования на проход сборным абразивным инструментом. Абразивный инструмент на операции

шлифования сферы представляет собой сборный шлифовальный круг, состоящий из трех кругов различных характеристик: 14AF900В (круг 1, черновое шлифование), 14AF120KR (круг 2, получистовое), 14AF400JB4 (круг 3, чистовое). Перед шлифованием цилиндрическую поверхность сборного инструмента правят на радиус, соответствующий радиусу сферической поверхности конического ролика подшипника. За один проход по вогнутоправленной сферической поверхности сборного абразивного инструмента в одной операции происходит совмещение чернового, получистового и чистового шлифования сферической поверхности конического ролика. В результате обработки формируется сферическая поверхность на торце ролика с заданными геометрическими и микрогеометрическими параметрами.

Измерения параметров выполняли в лабораториях ОАО «ЕПК Волжский». Контроль шероховатости Ra , волнистости W осуществляли на профилографе Form Talysurf, круглости Δ – на кругломере Talugond. Вибрации подшипника измеряли на установке КВП-3 с использованием измерителя уровня вибраций ИУВ-3М, пьезоэлектрический датчик которого устанавливают на наружном кольце подшипника. Определяли общий уровень вибрации (ОУВ) по виброускорению в диапазоне частот 50–10000 Гц и уровень вибрации в трех полосах частот по виброскорости в диапазоне частот 50–300 Гц, 300–1800 Гц и 1800–10000 Гц. Параметры звукового давления подшипника измеряли анализатором шума и вибрации «Ассистент S» (фильтр частот «А», в диапазоне 31,5 Гц – 16 000 Гц).

В процессе исследования разработаны математические модели траекторий царапин на сферической поверхности ролика, учитывающие движения вершины зерна по окружности с изменяемой скоростью резания, что обусловлено сферической поверхностью сборного шлифовального круга, вращением ролика вокруг своей оси и круговой подачей вращающегося ролика в прижимных дисках. Получены математические модели скорости подачи для любой точки обрабатываемой поверхности. С использованием полученных формул рассчитаны скорости подачи трех типов конических роликов. Исследована кинематика единичного абразивного зерна при обработке базовой торцевой сферической поверхности конического ролика, разработаны математические модели траектории царапины зерна и закономерности изменения припуска за время прохождения роликом зоны шлифования [7].

На рис. 1 представлен фрагмент сферической поверхности ролика после шлифования сборным абразивным кругом. Пересечение царапин обусловлено ранее отмеченными особенностями кинематики процесса шлифования.

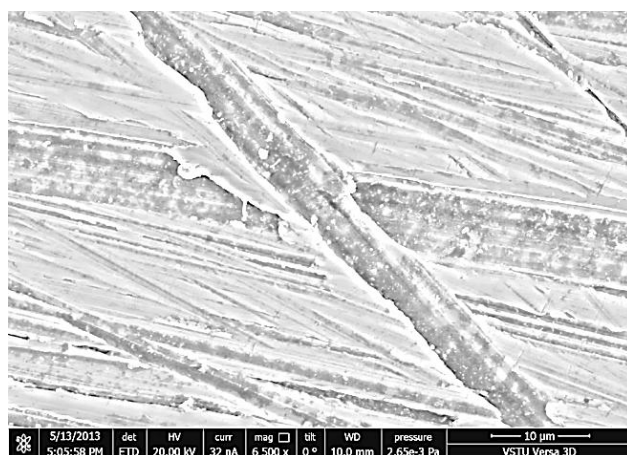


Рис. 1. Траектории царапин на сферической поверхности ролика

Для исследования влияния микрогеометрических параметров сферы ролика на показатели вибрации и шума подшипников подготовлена партия в количестве 200 роликов. По параметру шероховатости поверхности сферы (Ra) из данной партии отобрано два комплекта роликов по 17 штук в каждом, что соответствует количеству роликов в одном подшипнике. Комплект 1 сформирован роликами, шероховатость сферической поверхности которых изменяется в пределах нижней границы поля допуска $0,05 < Ra \leq 0,10$ мкм, шероховатость

поверхности роликов комплекта 2 соответствует середине поля допуска $0,10 < Ra \leq 0,20$ мкм. На сферической поверхности роликов в соответствии с требованиями конструкторской документации определены волнистость (W) и круглость (Δ). Средние значения микрогеометрических параметров (Ram , Wm , Δm) сфер роликов комплекта 2 значительно превосходят микрогеометрические параметры сфер роликов комплекта 1: Ram – в 2,4 раза, Wm – в 3,1 раза, Δm – в 4,3 раза.

Ролики комплекта 2 установлены в подшипник. В соответствии с методикой измерений в виброакустической лаборатории определены численные значения параметров вибрации и звукового давления собранного подшипника. Для определения влияния количества роликов комплекта 1 на изменение шума (уровня звукового давления) и вибраций подшипника ролики 2-го комплекта были поочередно заменены на ролики комплекта 1. При каждой смене ролика комплекта 2 на ролик комплекта 1 измеряли уровень звукового давления и вибрацию подшипника. В результате все 17 роликов комплекта 2 были заменены на ролики комплекта 1.

Установлено, что ролики из комплекта 1 оказывают значимое влияние на снижение показателей ОУВ, уровень вибрации в 3-й полосе частот и уровень звукового давления (рис. 2).

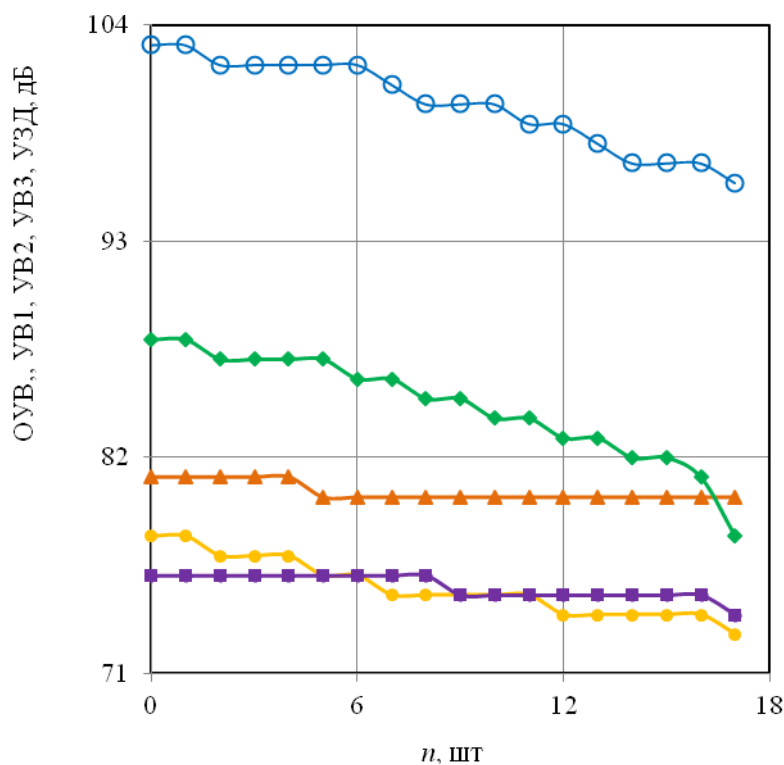


Рис. 2. Зависимость вибрации и звукового давления подшипника от количества роликов n из комплекта 2:

- – общий уровень вибрации (ОУВ), ◆ – уровень вибрации в 3-й полосе частот (УВ3),
- ▲ – уровень вибрации во 2-й полосе частот (УВ2), ● – уровень звукового давления (УВД),
- – уровень вибрации в 1-й полосе частот (УВ1)

Установлено, что за период стойкости шлифовального круга количество зерен на круге 3 (чистовая операция) уменьшается на 30 %, при этом на круге 1 (черновая операция) и круге 2 (получистовая операция) количество практически неизменно – уменьшение менее 1 %. Изменение количества впадин, оставленных вершинами зерен шлифовального круга на ролике в начале и в конце периода стойкости, уменьшается на 10 %. Шероховатость (Ra) обработанной поверхности сферы ролика возрастает в два раза – с 0,14 до 0,27 мкм. Параметр профиля поверхности ролика (Rp), характеризующий число элементов профиля

на 1 см длины, снижается с 1160 в начале периода стойкости до 717 в конце периода. Уменьшение количества контактирующих и режущих вершин зёрен оказывает влияние на качество обработанной поверхности.

Заключение

Повышение вибрационного разряда подшипника с Ш1 до Ш2-Ш3 возможно в результате использования роликов стандартного исполнения из общего производственного потока в результате введения дополнительной правки составного абразивного инструмента через каждый час работы. С учетом того, что время правки сборного абразивного инструмента по действующему технологическому процессу составляет не более 5 минут, снижение производительности при получении роликов более высоко вибрационного разряда не превышает 4–5 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прилуцкий, В.А. Поиск перспективных схем базирования и способов шлифования сферических торцев конических роликов / В.А. Прилуцкий, В.А. Парфенов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4–2. – С. 347–351. – EDN XAZPYH.
2. Носов, Н.В. Исследование шероховатости поверхностей конических роликовых подшипников / Н.В. Носов, Л.Н. Михайлова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 4 (2). – С. 232–237.3. – EDN YTDXGH.
3. Вибрация как показатель технического состояния подшипника качения и технологического уровня его восстановления / А.А. Никитин, В.В. Погораздов, С.В. Дробязко, В.В. Лукьяненко, П.Ф. Шпак // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 10. – С. 35–37. – EDN NAVEND.
4. Чечуевский, В.П. Экспериментальные исследования оценки технического состояния неразборных подшипников качения авиационных двигателей по уровню их вибрации / В.П. Чечуевский, Э.А. Шкалик // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2011. – № 1. – С. 76–82. – EDN QYVRZL.
5. Носенко, В.А. Влияние микрогеометрических параметров сферической поверхности ролика на звуковое давление и вибрацию подшипника / В.А. Носенко, А.В. Зуев, В.Е. Орлянский // Научные технологии в машиностроении. – 2024. – № 1 (151). – С. 30–40. – DOI: 10.30987/2223-4608-2024-30-40. – EDN TRFWHD.
6. Li, P. Study on Three Axis Vibration Measurement Technology of Roller Bearing / P. Li, Y. Zhang, D. Huang // Vibroengineering Procedia. – 2016. – Vol. 10. – Pp. 144–148.
7. Носенко, В.А. Разработка математической модели траектории царапины единичного зерна при обработке сферической поверхности ролика на шлифовальном станке SХК-5А / В.А. Носенко, А.В. Зуев, Е.В. Рыженко // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–1. – С. 140. – EDN SHCLVW.
8. Патент № 2792174 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/58, B24B 51/00. Способ определения количества давящих и режущих вершин зерен абразивного инструмента: № 2022117440: заявл. 28.06.2022; опубл. 17.03.2023 / В.А. Носенко, Р.А. Белухин, М.В. Даниленко, Е.Л. Еремина, А.В. Зуев; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». – EDN JFFGPU.

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И СТЕПЕНИ ЗАСАЛЕННОСТИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Осипов А.А.¹, аспирант, Осипов А.П.¹, к.т.н., доцент, Носов Н.В.², д.т.н., профессор

¹ Филиал Самарского государственного технического университета в г. Сызрани,
г. Сызрань, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: cah-oc@mail.ru

Проведен анализ способов определения степени засаленности рабочей поверхности, а также контроля режущей способности абразивного инструмента. Установлены требования к реализации рассмотренных способов на рабочем месте шлифовщика. Определены преимущества и недостатки рассмотренных способов, прототипы технических решений для дальнейшего использования в научных исследованиях.

Ключевые слова: шлифование, рабочая поверхность абразивного инструмента, режущая способность, самозатупление, самозатачивание

ON THE ISSUE OF DETERMINING THE CUTTING ABILITY AND DEGREE OF GREASINESS OF AN ABRASIVE TOOL

Osipov A.A.¹, PhD student, Osipov A.P.¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Nosov N.V.², Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

¹ Syzran Branch of Samara State Technical University, Syzran, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: cah-oc@mail.ru

The analysis of methods for determining the degree of greasiness of the working surface, as well as methods for controlling the cutting ability of an abrasive tool, is carried out. The requirements for the implementation of the considered methods at the grinder's workplace have been established. The advantages and disadvantages of the considered methods are identified, as well as prototypes of technical solutions for further use in scientific research.

Keywords: grinding, working surface of the abrasive tool, cutting ability, self-blunting, self-sharpening

Повышение стойкости абразивного инструмента – это всегда важная и актуальная задача. Повышение стойкости удешевляет процесс шлифования, увеличивает общую производительность. Известно, что абразивный инструмент может работать как в режиме затупления, так и в режиме самозатачивания, что зависит от режима резания. Можно предположить, что обоснованный перевод шлифовального круга с чистовых переходов на черновые для восстановления режущей способности и обратно позволит значительно повысить стойкость абразивного инструмента.

Для разработки модели оптимизации процесса шлифования с обоснованным переводом шлифовального круга (ШК) с чистовой операции на черновую для восстановления режущей способности абразивного инструмента (АИ) и обратно на чистовую операцию необходимо уметь оценивать режущую способность АИ.

На чистовых режимах, где происходит процесс самозатупления круга, такую оценку можно вести по радиальному износу абразивных зерен или по доле засаленных, загрязненных участков рабочей поверхности – то есть по фактору, который можно измерить.

Например, известен способ контроля затупления шлифовальных кругов в процессе обработки металлов, согласно которому «регистрируют световой поток раскаленных частиц

обрабатываемого металла, налипших на рабочую поверхность круга, преобразуют полученный сигнал в электрический и по изменению его величины судят о затуплении круга» [1].

Известен способ контроля затупления шлифовальных кругов, где используется «датчик акустических колебаний, расположенный на кратчайшем расстоянии от плоскости резания с возможностью взаимодействия с поровым пространством круга посредством выполненного в торцовой плоскости планшайбы канала. Микропроцессор служит для преобразования полученных сигналов с датчика акустических колебаний и датчика положения в сигналы управления исполнительными механизмами станка. Устройство повышает надежность и быстродействие контроля режущей способности абразивного круга» [2].

Известен способ контроля степени засаливания абразивного инструмента «по изменению интенсивности радиоактивного излучения рабочей поверхности предварительно активированного абразивного круга при засаливании» [3]. Однако применение такого способа крайне ограничено повышенной опасностью для обслуживающего персонала.

Известен также способ определения степени засаленности шлифовального круга «с использованием бесконтактных датчиков, чувствительные элементы которых располагают с зазором со стороны торцов круга. Недостатками этого способа являются, во-первых, необходимость частой поднастройки датчика для поддержания определенного зазора между торцами круга и датчиками, что влияет на их рабочие параметры в процессе работы по мере износа и правки круга, во-вторых, – невозможность определения степени засаленности абразивного круга при шлифовании неметаллических материалов» [4].

В предложенном [5] устройстве для осуществления способа контроля степени засаливания абразивного инструмента чувствительный элемент датчика давления помещают в осевую открытую полость, выполненную в шпинделе, которая имеет радиальные отверстия, выходящие на центрирующую круг поверхность. Вследствие наличия в шпинделе осевой полости и радиальных отверстий при вращении абразивного круга там создается зона пониженного статического давления воздуха. Незасаленный круг, имеющий чистую рабочую поверхность, создает в осевой полости шпинделя пониженное статическое давление воздуха. Течение воздуха через поры шлифовального круга непрерывное, установившееся. При достижении критической степени засаленности, соответствующей определенной величине статического давления воздуха, цикл шлифования прекращается и осуществляется своевременная правка абразивного круга.

На черновых режимах при самозатачивании круга необходимо контролировать обновление рабочей поверхности, следить, чтобы старые изношенные зерна выпадали, вырывались из связки, а новые, острые зерна, наоборот, вскрывались и начинали резать.

Известен способ определения режущей способности шлифовального круга, при котором «определяют объем материала, снимаемого с заготовки в единицу времени, при шлифовании с фиксированным значением продольной подачи и предельно допустимую глубину шлифования, и соответствующую ей температуру в зоне резания. Режущую способность круга определяют как отношение объема материала, снимаемого в единицу времени, к определенной величине температуры» [6].

Существует способ определения режущих свойств абразивного инструмента, который включает в себя «подвод и прижатие предварительно правленного абразивного инструмента к полированной поверхности образца, последовательное взаимно-перпендикулярное перемещение образца относительно неподвижного абразивного инструмента, измерение размеров отпечатков, оставленных активной частью вершин абразивных зерен на полированной поверхности образца. Выбор абразивного инструмента с наилучшими режущими свойствами осуществляют по наибольшей суммарной площади отпечатков» [7].

Известен способ контроля работоспособности шлифовального круга путем определения плотности теплового потока в зоне шлифования. «Способ включает измерение температуры заготовки на глубине поверхностного слоя и вычисление плотности теплового потока в зоне шлифования в одном сечении обрабатываемой заготовки двумя или более термопарами с различной толщиной термоэлектродов в направлении вектора скорости заготовки» [8].

Подобный метод используется и в патенте [9]. Только данный способ «предусматривает измерение касательной составляющей силы шлифования P_z , а затем определение плотности теплового потока».

В способе [10] «в качестве параметра, характеризующего тепловой процесс, используют скорость изменения пограничного слоя тепловой деформации режущей части шлифовального круга. Упомянутую скорость определяют с использованием во время шлифования правящего и контрольного кругов с равными диаметрами». В результате повышается точность контроля, способствующая повышению качества и производительности шлифования. Недостатком указанных способов является длинная опосредованная процедура определения режущей способности абразивного инструмента (АИ).

Известен способ определения работоспособности цилиндрических шлифовальных кругов при плоском продольном шлифовании периферийной поверхностью, где «в качестве критерия, определяющего работоспособность шлифовальных кругов, используют отношение разницы между расстоянием от шлифуемой поверхности образца до поверхности стола станка и расстоянием от прошлифованной поверхности образца до стола станка к длине шлифуемой поверхности образца» [11].

Известен способ оценки работоспособности шлифовального круга по его удельному износу [12]. В этом способе определяются объем сошлифованного материала образца и объем израсходованного абразива шлифовального круга, который измеряется как разность значений радиуса шлифовального круга до и после шлифования. Удельный износ определяется как частное от деления объема израсходованного абразива на объем сошлифованного материала. Недостатком данного решения является наличие погрешности определения удельного износа. К недостатку также следует отнести изготовление специальной планшайбы, установку на ней кольца соосно рабочей поверхности круга и доработку кожуха, закрывающего шлифовальный круг.

Известен способ оценки работоспособности шлифовального круга, заключающийся в том, что «кругу сообщают вынужденные колебания, регистрируют параметры колебательного процесса, по которым судят о стойкости, при этом кругу сообщают вращение, вводят его в контакт с обрабатываемой деталью, увеличивают усилие прижима до возникновения резонанса, регистрируют время затухания резонанса, которое принимают за основной параметр. Недостатком способа является необходимость применения специального оборудования и приборов для сообщения кругу колебательного процесса, регистрирования возникающего резонанса и времени его затухания. Кроме того, отсутствует привязка к конкретным условиям шлифования и режиму обработки» [13].

Известен способ определения коэффициента режущей способности шлифовального круга, «включающий измерение припуска, снятого с детали за определенный период шлифования, отличающийся тем, что регистрируют изменение радиального усилия шлифования во времени, а коэффициент режущей способности определяют как отношение объема снятого за время опыта металла к площади осциллограммы радиального усилия, приведенной к натуральному масштабу» [14].

На основе анализа рассмотренных работ можно сделать следующие выводы:

1. Способы определения засаленности, самозатупления и режущей способности АИ очень сходны. Практически все они в качестве критерия используют производительность, усилие или энергию шлифования.

2. Установлено, что способы непосредственного измерения производительности или линейного износа имеют большую погрешность измерений, а способы косвенного измерения через усилие и энергию шлифования требуют специального оборудования, процедуры измерения и зачастую не могут быть реализованы на рабочем месте.

3. По мнению авторов, наиболее простыми, менее затратными и достаточно точными способами определения состояния режущей поверхности (РП) абразивного инструмента (АИ) могут стать при определении степени засаленности РП АИ способ по патенту [5], а при определении режущей способности – способ по патенту [7]. Их реализация на рабочем месте не вызовет значительных трудностей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № SU 526499 A1, СССР, МПК В24В 51/00(2006.01), В24В 55/00(2006.01). Способ контроля затупления шлифовальных кругов: № 1991439: заявл. 1974.01.11: опубл. 1976.08.30 / Борисов Б.Я., Каморкин А.Н., Козыряцкий И.П., Костенко Н.А., Борисов А.Б. – 2 с.
2. Патент № RU 2 116 185 С1, Российская Федерация, МПК В24В 55/00(2006.01). Устройство для контроля режущей способности абразивного круга: № 96103008/02: заявл. 1996.02.15: опубл. 1998.07.27 / Гурьянихин В.Ф., Макеев А.В., Юганов В.С. – 6 с.
3. Патент № SU 134579 A1, СССР, МПК В24В 55/00(1995.01), В24В 49/00(1995.01). Способ контроля степени засаливания абразивного инструмента: № 665974: заявл. 1960.05.03: опубл. 1960.10.10 / Рапопорт Ю.М., Хаит А.Л. – 2 с.
4. Патент № US 3517460 А, United States, МПК В24В 5/04, 53/14, 55/04. Abrading tool control systems: № 545363: заявл. 1966.04.26: опубл. 1970.06.30 / Donald R Stewart, Ellis D Kane. – 14 с.
5. Патент № SU 598746 A1, СССР, МПК В24В 55/00(2006.01). Способ определения степени засаленности абразивных кругов и устройство для его осуществления: № 2381335: заявл. 1976.06.28: опубл. 1978.03.25 / Гурьянихин В.Ф., Белов М.А. – 3 с.
6. Патент № SU 1 301 670 A1, СССР, МПК В24В 49/00(2006.01). Способ определения режущей способности шлифовального круга: № 3874354: заявл. 1985.03.27: опубл. 1987.04.07 / Давыдов В.М. – 2 с.
7. Патент № SU 1 565 650 A1, СССР, МПК В24В 1/00(2006.01). Способ определения режущих свойств абразивного инструмента: № 4287724: заявл. 1987.07.21: опубл. 1990.05.23 / Пузанов В.В., Каракулова М.Л., Хватов А.И. – 3 с.
8. Патент № RU 2 198 779 С2, Российская Федерация, МПК В24В 49/14(2006.01), G01K 7/02(2006.01). Способ определения локальных значений плотности теплового потока в зоне шлифования: № 2001105556/02: заявл. 2001.02.27: опубл. 2003.02.20 / Хусаинов А.Ш. – 8 с.
9. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – Киев: Лыбидь, 1991. – С. 165.
10. Патент № RU 2 370 356 С2, Российская Федерация, МПК В24В 49/18(2006.01). Способ контроля работоспособности шлифовального круга: № 2007147692/02: заявл. 2007.12.20: опубл. 2009.10.20 / Иванов А.Г., Салова Д.П., Салов П.М., Малеева С.Б. – 12 с.
11. Патент № RU 2 736 593 С1, Российская Федерация, МПК G01N 3/58(2006.01). Способ оценки работоспособности шлифовальных кругов: № 2020121862: заявл. 2020.06.26: опубл. 2020.11.18 / Непомнящий В.А., Колобков А.В. – 11 с.
12. Патент № RU 2 613 254 С1, Российская Федерация, МПК G01N 3/58(2006.01), В24В 1/00(2006.01). Способ определения удельного износа шлифовального круга: № 2015139640: заявл. 2015.09.17: опубл. 2017.03.15 / Непомнящий В.А., Михрютин В.В., Колобков А.В. – 11 с.
13. Патент № SU 951124 A1, СССР, МПК G01N 3/58(2006.01). Способ оценки работоспособности абразивных кругов: № 2997576: заявл. 1980.10.24: опубл. 1982.08.15 / Герасимов В.С., Мечетнер Б.Х., Шишков Н.З., Израилович М.Я., Волков В.А., Асташев В.К., Колчеманов Н.А., Кузнецов В.А. – 2 с.
14. Патент № SU 988534 A1, СССР, МПК В24В 49/00(2006.01), В23Q 15/00(2006.01). Способ определения коэффициента режущей способности шлифовального круга: № 3302772: заявл. 1981.06.11: опубл. 1983.01.15 / Ящерицын П.И., Махаринский Е.И., Махаринский Ю.Е. – 3 с.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА СНИЖЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ

Осипов А.А.¹, аспирант, Осипов А.П.¹, к.т.н., доцент, Носов Н.В.², д.т.н., профессор

¹ Филиал Самарского государственного технического университета в г. Сызрани, г. Сызрань, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: alekseyosipov@mail.ru

Представлены результаты анализа влияния режимов резания на шероховатость шлифованной поверхности. Отмечена эффективность влияния реверсирования скорости круга на возвратном движении стола и увеличение продольной подачи на выхаживающих ходах на высотные параметры.

Ключевые слова: шероховатость, режим резания, высотные параметры

ON THE ISSUE OF THE EFFECT OF CUTTING MODES ON REDUCING THE ROUGHNESS OF THE GROUND SURFACE DURING FLAT GRINDING

Osipov A.A.¹, PhD student, Osipov A.P.¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Nosov N.V.², Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

¹ Syzran Branch of Samara State Technical University, Syzran, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: alekseyosipov@mail.ru

The results of the analysis of the effect of cutting modes on the roughness of the polished surface are presented. The effectiveness of the effect of reversing the speed of the circle on the return movement of the table and an increase in the longitudinal feed on the nursing strokes on the altitude parameters is noted.

Keywords: roughness, cutting modes, height parameters

Достижение требуемой шероховатости поверхности за наименьшее время является актуальной задачей, однако существующие методы уменьшения шероховатости не удовлетворяют потребностям производств. Требуется найти способы уменьшения высотных параметров, которые позволят уменьшить время обработки, что даст возможность увеличить производительность процесса шлифования и стойкость инструмента.

Для того чтобы выбрать наиболее эффективные методы достижения требуемой шероховатости, нужно рассмотреть факторы, с помощью которых можно улучшить шероховатость поверхности.

Общеизвестно, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывают глубина резания и скорость подачи заготовки [1–3]. Уменьшение глубины резания и скорости подачи заготовки уменьшает высотные параметры шероховатости. На взгляд авторов, технологические приемы, связанные с влиянием режима резания, не до конца изучены.

Например, В.И. Свирщев в патенте на изобретение [4] предлагает повышать качество шлифованных поверхностей изменением направления возвратно-поступательного перемещения стола станка с одновременным изменением направления вращения шлифовального круга на противоположное, чтобы при каждом очередном проходе осуществлялось встречное шлифование. То есть используется изменение направления вектора скорости резания. Однако особенности данного технологического приема и степень его влияния автор в свободной печати не опубликовал.

А.С. Судариков и О.Н. Ушанев [5] в качестве изменяемого параметра режима резания выбирают скорость вращения шлифовального круга, регулируемую из условия поддержания температуры шлифования на одном максимально допустимом теплофизическими свойствами материала уровне в течение всего цикла обработки, при этом температуру шлифования $T_{ш}$ для каждого прохода определяют по формуле

$$T_{ш} = \frac{2\varphi \cdot N_{уд}}{\lambda \cdot s_k \cdot \sqrt{D_n \cdot t}} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau} \cdot F\left(\frac{\delta}{2\sqrt{\alpha \cdot \tau}}\right) = T_{крит}, \quad (1)$$

где $\varphi = 0,7-0,9$ – коэффициент ввода тепла в деталь;
 $N_{уд}$ – удельная мощность шлифования;
 λ – коэффициент теплопроводности материала детали;
 s_k – продольная подача шлифовального круга;
 D_n – приведенный диаметр шлифовального круга:

$$D_n = D\left(1 \pm \frac{D}{d}\right), \quad (2)$$

где D – диаметр шлифовального круга;
 d – диаметр детали;
 знак (+) относится к круглому наружному шлифованию периферией круга, (-) – к внутреннему, при плоском шлифовании;
 $D_n = D$;
 t – глубина резания;
 α – коэффициент температуропроводности материала детали;
 τ – время контакта поверхностных точек детали со шлифовальным кругом:

$$\tau = \frac{\sqrt{D_n \cdot t}}{V_k}, \quad (3)$$

где V_k – частота вращения шлифовального круга;
 δ – припуск на обработку;
 $T_{крит}$ – критическая температура нагрева материала детали, соответствующая границе бесприжогового шлифования. То есть скорость резания непостоянна по длине обрабатываемой поверхности.

Ю.С. Степанов, А.В. Киричек в своей работе [6] предлагают способ шлифования, в котором инструменту сообщается вращательное движение и поперечная подача на каждый двойной ход стола с заготовками, при этом столу с заготовками сообщают продольную возвратно-поступательную подачу, отличающуюся тем, что заготовкам дополнительно сообщают кругильные вибрационные движения посредством устройства, нижняя часть корпуса которого выполнена с возможностью закрепления на столе станка, а верхняя часть – с возможностью установки на ней обрабатываемых заготовок. То есть в режим резания добавляется угловая скорость вращения заготовки.

В работе [7] Н.С. Дегтяренко и В.Л. Белостоцкого на этапе выхаживания с целью повышения качества поверхностного слоя обрабатываемой детали скорость врезания изменяют по закону, определяемому уравнением

$$v_{кр} = v_0 \cdot e^{-k\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2}, \quad (5)$$

где $v_{кр}$ – скорость врезания в данный момент времени;
 v_0 – начальная скорость врезания;
 τ – время от начала контакта круга с изделием;
 τ_0 – продолжительность периода врезания;

k – коэффициент формы изменения скорости врезания во времени;

e – основание натурального логарифма.

Причем наибольшее значение скорости принимают в начале этапа врезания. С целью получения минимальной температуры в течение этапа врезания коэффициент формы изменения скорости врезания принимают равным 2.

Профессор Л.В. Худобин показал в своей работе [8], что можно не только изменять направление вектора подачи или скорости круга, но и менять их величину. Он использует устройство для микроподачи заготовок, с помощью которого осуществляют врезную подачу неравномерно и непрерывно в течение всего цикла плоского шлифования, за исключением последних одного или нескольких двойных ходов стола станка, причем врезную подачу изменяют по зависимости

$$S_t = n \cdot \sqrt{t}, \quad (8)$$

где t – время шлифования, мин;

n – коэффициент, зависящий от группы шлифуемости и склонности к прижогаобразованию материала заготовки, мм/мин^{3/2}.

В другой своей работе [9] Л.В. Худобин предлагает способ плоского шлифования с помощью устройства для микроподачи заготовок, в котором заготовке и инструменту сообщаются относительные перемещения в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, отличающийся тем, что на последних нескольких двойных ходах стола станка осуществляют ускоренное выхаживание, реализуемое путем быстрого отвода заготовки от круга на величину, несколько меньшую величины *натяга*, созданного в системе в процессе шлифования. То есть фактически меняется направление поперечной подачи – от заготовки.

Приведенный анализ работ позволил сделать следующие выводы:

1. Существующие технологии шлифования предусматривают постоянные значения и направления движений инструмента и заготовки. Как правило, это вращение шлифовального круга, перемещение круга относительно заготовки вдоль вектора окружной скорости круга перпендикулярно этому вектору (поперечная подача и глубина резания).

2. Исследователи предлагают новые технологические приемы с изменением направления скоростей и подач введением новых режимных параметров. Однако большинство решений не подтверждены теоретически и экспериментально.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974.
2. Лурье, Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
3. Ипполитов, Г.М. Абразивные инструменты и их эксплуатация / Г.М. Ипполитов. – М.: МАШГИЗ, 1959.
4. Патент 889389 Российская Федерация, МПК В24В 7/00. Способ шлифования плоских поверхностей. Т. 4. – М., 1977. – С. 71–72.
5. Патент Ru 2 021 093 С1 Российская Федерация, МПК В24В1/00(2006.01). Способ шлифования. – М., 2006.
6. Патент RU2449871С1 Российская Федерация, МПК В24В1/04 В24В7/02 В23Q3/02. Способ вибрационного плоского шлифования. – М., 2012.
7. Патент SU677883А1 СССР, МПК В24В7/00. Способ плоского шлифования. – М., 1979.
8. Патент RU2191672С1 Российская Федерация, МПК В24В1/00 В24В7/02. Способ шлифования плоских поверхностей. – М., 2002.
9. Патент RU 2004101448 А Российская Федерация, МПК В24В 1/00, В24В 7/02. Способ шлифования плоских поверхностей. – М., 2005.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Рогожников И.А., аспирант

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

Рассматривается способ повышения эффективности шлифования деталей газотурбинных двигателей, в частности деталей, изготовленных из жаропрочных сплавов, с помощью интеграции в производственный процесс адаптивных систем управления станком. Представлен алгоритм работы адаптивных систем управления, а также изложены актуальные проблемы, связанные с интеграцией АСУ в производственный процесс.

Ключевые слова: шлифование, адаптивные системы управления, эффективность, станки с ЧПУ

IMPROVING THE GRINDING EFFICIENCY OF GTE PARTS USING ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS

Rogozhnikov I.A., PhD student

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

A method is being considered to increase the grinding efficiency of gas turbine engine parts, in particular parts made of heat-resistant alloys, by integrating adaptive machine control systems into the production process. The algorithm of adaptive control systems operation is considered, as well as actual problems related to the integration of automated control systems into the production process.

Keywords: grinding, adaptive control systems, efficiency, CNC machines

Авиастроение является одной из самых наукоемких отраслей в машиностроении. Современные летательные аппараты требуют применения различных дорогостоящих и сложноизготавливаемых деталей. Так, в газотурбинных двигателях применяются особые жаропрочные материалы, к которым предъявляются повышенные требования, так как это необходимо для обеспечения требуемых характеристик двигателя. В частности, из жаропрочных сплавов изготавливают рабочие лопатки. К данным деталям, в частности к замковой части, предъявляются высокие требования по точности и качеству обработанной поверхности. Поэтому для обработки замковой части лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) применяют шлифование.

Одной из важнейших проблем при шлифовании деталей из жаропрочных сплавов являются тепловые деформации вследствие низкой теплопроводности обрабатываемых материалов. К таким материалам можно отнести, например, сплав ВЖЛ2-ВИ, представляющий группу литейных сложнолегированных многофазных износостойких жаропрочных сплавов на никелевой основе. Данный сплав применяется для производства лопаток и других отливок деталей газовых турбин.

Тепловые деформации являются важной проблемой, которая требует решения, так как они способны привести к следующим результатам: снижение усталостной прочности из-за образования остаточных напряжений, что особенно характерно для деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, как, например, в ГТД; ухудшение качества поверхности;

образование прижогов (рис. 1), микротрещин в поверхностном слое; обезуглероживание поверхностного слоя [1].

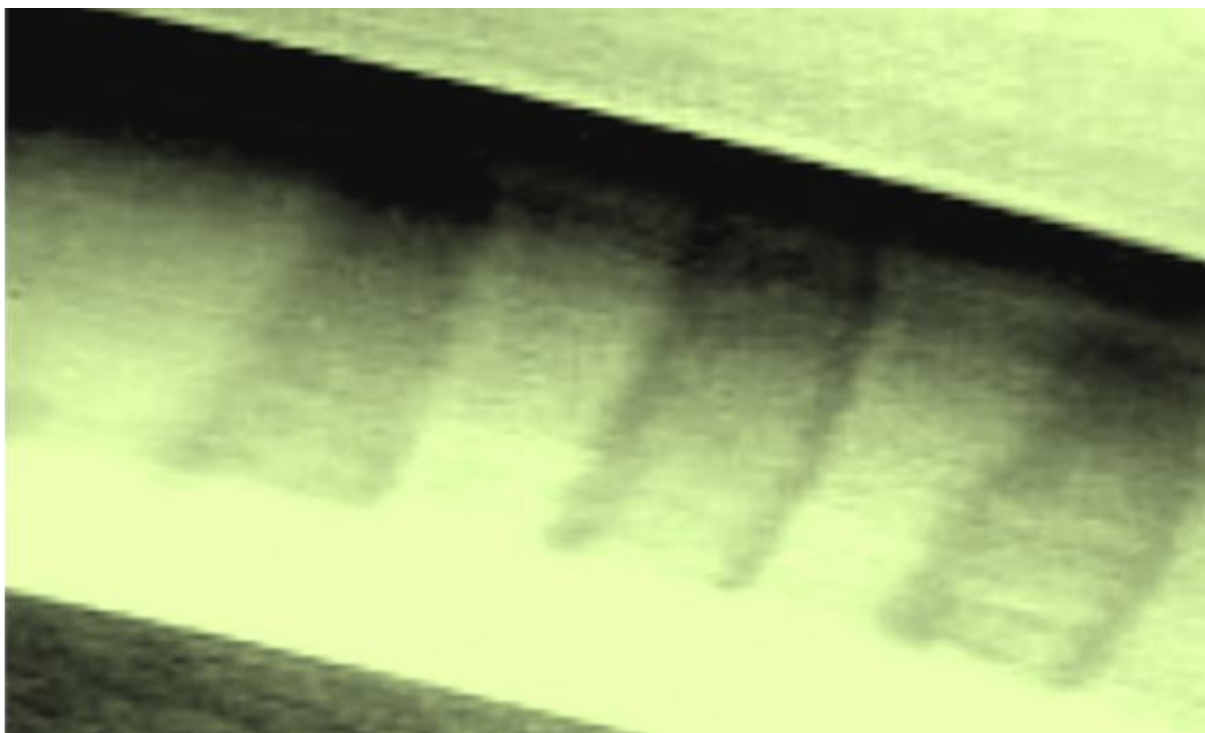


Рис. 1. Прижоги поверхности, образованные при шлифовании

В настоящее время одним из самых распространенных решений данной проблемы при обработке никелевых сплавов является применение кругов из кубического нитрида бора (эльбора). К преимуществам данного инструмента относятся высокая твердость и износостойкость, хорошая теплопроводность и устойчивость к температурам.

Проблемой является то, что при шлифовании деталей в зоне резания возможно изменение температуры и появление вибраций, которые нельзя отследить оператору в момент их образования, что приводит к деформациям обрабатываемой поверхности и быстрому износу абразивного круга.

Решающим фактором для минимизации рисков возникновения подобных ситуаций является применение адаптивных систем управления. Адаптивная система управления (АСУ) – технология автоматической регулировки параметров обработки на основе данных, получаемых датчиками и системами мониторинга. Данные системы особенно важны при высокоточной обработке, так как позволяют избежать повреждения обрабатываемой детали и абразивного круга.

В зависимости от системы ЧПУ интерфейс адаптивной системы управления может быть как полностью интегрированным внутрь системы ЧПУ станка, так и представлять собой отдельное аппаратное устройство.

АСУ состоит из нескольких узлов (рис. 2):

1) датчики: силовые – измеряют силы резания; температурные – измеряют температуру в зоне резания; акустические – измеряют уровень вибраций; оптические – контролируют качество обрабатываемой поверхности;

2) микропроцессоры, которые считывают данные с датчиков и в случае необходимости с помощью алгоритмов машинного обучения или искусственного интеллекта корректируют параметры обработки;

3) органы станка, которые воспринимают входящий сигнал от микропроцессора и корректируют скорость вращения шпинделя, подачу, количество и давление охлаждающей жидкости.

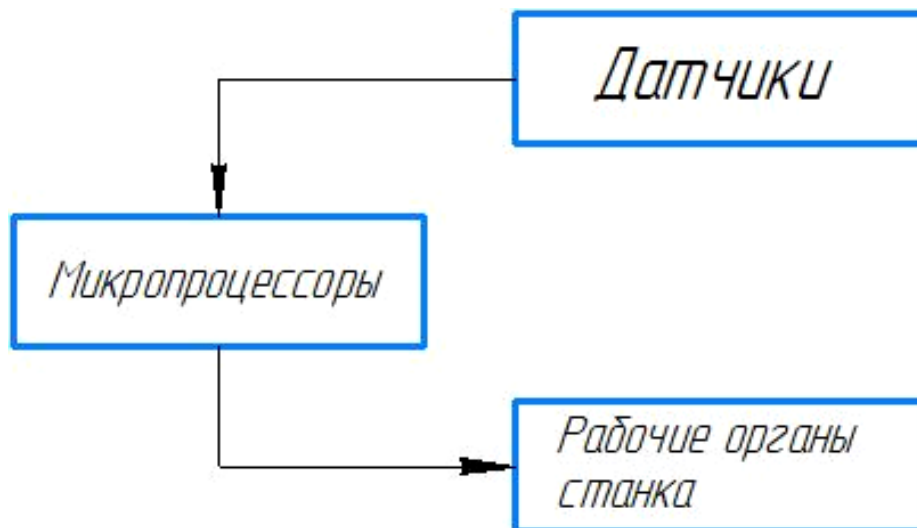


Рис. 2. Упрощенная схема адаптивной системы управления

Алгоритм работы АСУ включает следующие этапы: датчики непрерывно собирают информацию о различных параметрах в зоне резания, микропроцессоры в реальном времени производят анализ данных, полученных от датчиков, проводят сравнение между полученными и оптимальными значениями и выявляют отклонения [2]. После чего, если были выявлены отклонения, вносятся корректировки в режимы резания и подачу СОЖ.

Кроме того, интеграция АСУ с искусственным интеллектом позволяет не только вносить коррективы по полученным показаниям с датчиков, но и прогнозировать возникновение усилий, приводящих к ухудшению качества поверхности и износу инструмента [3]. Это дает адаптивной системе управления возможность заранее вносить изменения в режимы резания, количество и давление СОЖ.

Однако на данный момент существует ряд проблем в интеграции АСУ с применением нейросетей:

- необходимость сбора большого объема экспериментальных данных для обучения нейросетевой модели;
- необходимость максимальной точности и скорости получаемых данных от датчиков, так как от этого напрямую зависит эффективность искусственного интеллекта;
- необходимость подключения нейросети к интернету, что создает повышенные риски кибератак и, соответственно, требуется внедрение защищенных протоколов обмена данными.

Таким образом, внедрение адаптивных систем управления с искусственным интеллектом способно обеспечить наилучший результат при шлифовании деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов, сократив влияние человеческого фактора, обеспечивая высокую точность и эффективность обработки. Но для полноценной интеграции данных систем в производственный процесс необходимо обеспечить высокую скорость, точность и безопасность передачи информации, а также осуществить сбор большого объема экспериментальных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кравченко, Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке / Б.А. Кравченко. – Куйбышев: КПТИ, 1981. – 90 с.
2. Адаптивное управление станками / Под ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.
3. Голубев, Ю.Ф. Нейросетевые методы в мехатронике / Ю.Ф. Голубев. – М.: Изд-во Московского университета, 2007. – 157 с.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАДИУСНОГО И КООРДИНАТНОГО МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЦЕНТРА ОКРУЖНОСТИ

Саламатов Е.С.¹, студент, Захаров О.В.², профессор, д.т.н., профессор

¹ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,

г. Саратов, Российская Федерация

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

г. Москва, Российская Федерация

E-mail: o.zakharov@stankin.ru

Окружность наименьших квадратов получила наиболее широкое применение для анализа круглости. Известные формулы для определения координат центра окружности зависят от радиусного или координатного метода измерения. В настоящей статье проведен численный анализ формул. Установлено, что обе известные формулы не являются точными. Применение известной формулы для радиусного метода возможно при условии предварительного центрирования.

Ключевые слова: измерение, круглость, окружность наименьших квадратов

COMPARATIVE EVALUATION OF THE RADIUS AND COORDINATE METHODS

Salamatov E.S.¹, student, Zakharov O.V.², Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

² Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russian Federation

E-mail: o.zakharov@stankin.ru

A least squares circle has been most widely used for the analysis of roundness. The known formulas for determining the coordinates of the circle center depend on the radius or coordinate methods of measurement. In this article, a numerical analysis of the formulas is carried out. It is established that both known formulas are not exact. The application of the well-known formula for the radius method is possible under the condition of preliminary centering.

Keywords: measurement, roundness, least squares circle

Круглость представляет собой одну из геометрических характеристик изделия, определяющих погрешность формы [1]. Около 70 % изделий являются телами вращения, сечение которых будет окружностью. Круглость характеризует отклонение реального профиля от идеальной окружности [2–4]. Круглость играет важную роль в процессах эксплуатации деталей машин и их производстве. Большинство механизмов реализует вращательное движение, поэтому сопряжение осуществляется по поверхностям вращения. Подавляющая часть операций механической обработки представляет собой формообразующее движение в виде вращения инструмента или заготовки. Таким образом, изучение методов измерения круглости является весьма актуальным.

Основная задача при обработке результатов измерения круглости – определение координат центра базовой окружности. После того как найден центр базовой окружности, определение значения круглости не представляет собой сложности и реализуется известными формулами [5–7]. Базовыми окружностями могут выступать: прилегающие охватывающая и охватываемая, минимальной зоны, наименьших квадратов. Более подробный анализ базовых окружностей представлен в работе [4]. Наиболее часто применяют окружность наименьших квадратов из-за простоты расчета и однозначности результата.

В книге [8] показано, что выбор метода обработки данных зависит от применяемого измерительного прибора. Координатный метод используется на координатно-измерительных машинах, а радиусный метод – на кругломерах. Очевидно, что оба метода должны приводить к одинаковому результату, однако на практике получаемые результаты не совпадают.

При использовании координатного метода (рис. 1, а) координаты центра окружности наименьших квадратов находятся по формуле

$$\begin{cases} a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \\ b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (1)$$

При использовании радиусного метода (рис. 1, б) координаты центра окружности наименьших квадратов находятся по формуле

$$\begin{cases} a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i \cos \varphi_i; \\ b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i \sin \varphi_i. \end{cases} \quad (2)$$

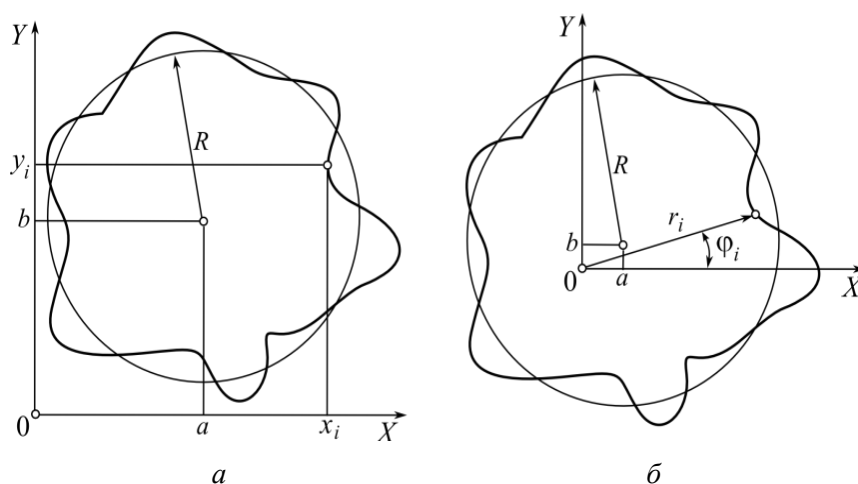


Рис. 1. Определение круглости:
а – координатный метод, б – радиусный метод

В книге [8] указано на ошибочность формул (1). Положение центра окружности наименьших квадратов нужно вычислять по формуле (2), приведенной в приложении F стандарта ISO 4291:1985. Однако в работах [9, 10] показано, что формула (2) также имеет ограничения.

Нами проведены численные эксперименты по формулам (1), (2). Профиль изделия с круглостью задавался тригонометрическим полиномом [10]:

$$r = R + \sum_{j=2}^m a_j \cos(j\varphi + \varphi_j), \quad (3)$$

где R – средний радиус;
 m – число гармоник;
 a_j – амплитуда j -й гармоники.

Профиль, описанный формулой (3), соответствует окружности минимальных квадратов. Тригонометрическая функция косинуса является периодической с периодом 2π , поэтому суперпозиция косинусов также периодическая.

В ходе исследования были смоделированы несколько профилей изделий с круглостью по формуле (3), затем задано смещение центра на величины a , b . Далее по формулам (1), (2) были определены координаты центра окружности наименьших квадратов. Примеры расчетов

даны на рис. 2, где обозначены центры: 0 – действительный, 1 – по формуле (1), 2 – по формуле (2). Анализ показал, что формула (1) дает более близкий к действительному результат. Ее применение возможно, если имеется достаточное количество измеренных точек и выполнено предварительное центрирование. При координатных измерениях начало системы координат обычно располагается вне измеренного профиля. В этом случае погрешности значительны и применение формулы (1) дает неудовлетворительный результат (см. рис. 2).

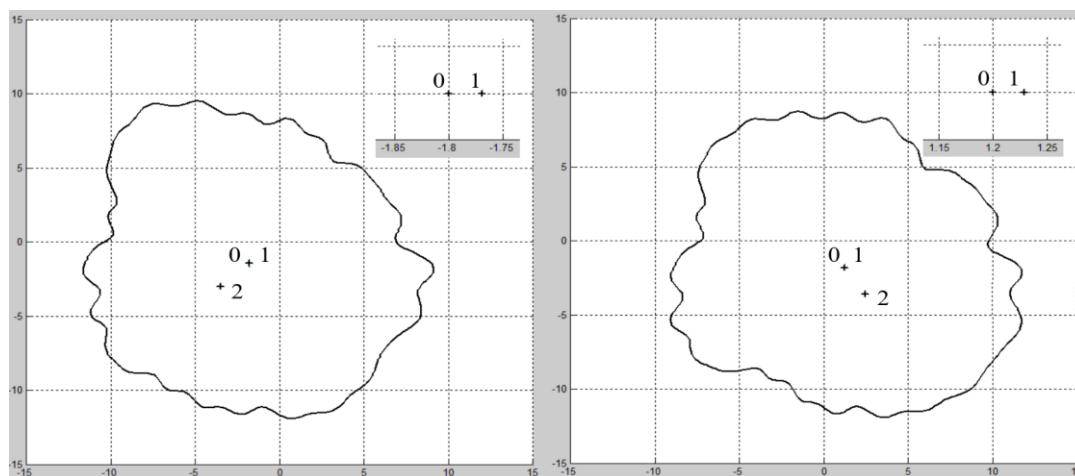


Рис. 2. Примеры определения окружности наименьших квадратов

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что известные формулы для расчета декартовых координат центра окружности наименьших квадратов являются приближенными. Для координатного метода измерения их использование приводит к неправильному результату. При радиусном методе измерения использование формулы возможно при условии точного предварительного центрирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кононогов, С.А. Координатная метрология / С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко. – М.: АСМС, 2010. – 380 с.
2. Выборочный измерительный контроль партий деталей с распределением размера по закону Рэлея / С.Н. Григорьев, П.Н. Емельянов, Д.А. Мастеренко, С.Е. Педь // Измерительная техника. – 2022. – № 6. – С. 28–35.
3. Епифанцев, К.В. Исследование процесса калибровки и настройки датчиков кругломера ROUNDTEST RA-120P / К.В. Епифанцев, Н.Ю. Ефремов // Датчики и системы. – 2022. – № 5 (264). – С. 57–61.
4. Захаров, О.В. Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения / О.В. Захаров, К.Г. Пугин // Измерительная техника. – 2022. – № 2. – С. 14–21.
5. Захаров, О.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Часть 1. Обзор профильных фильтров / О.В. Захаров, А.С. Яковишин, А.В. Жуков // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2022. – № 2 (93). – С. 22–37.
6. Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы / К.В. Епифанцев, Г.А. Петров, В.Н. Белоухов, О.А. Заякин // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 1. – С. 63–76.
7. Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции для дискового морфологического фильтра / О.В. Захаров, А.Г. Лаптев, В.Г. Лысенко и др. // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 35–40.
8. Whitehouse, D.J. Handbook of Surface and Nanometrology / D.J. Whitehouse. – Second Edition, CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton FL, London, 2011. – 999 p.
9. Захаров, О.В. Минимизация систематической погрешности при бесцентровом измерении круглости деталей / О.В. Захаров, А.В. Кочетков // Метрология. – 2015. – № 4. – С. 20–28.
10. Захаров, О.В. Методические основы гармонического анализа круглограмм / О.В. Захаров, В.В. Погораздов, А.В. Кочетков // Метрология. – 2004. – № 6. – С. 3–10.

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН

Трофименко Н.Г., аспирант

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

Приведены результаты применения восстановленных твердосплавных пластин. Предложена методика расчета пластин на прочность МКЭ после восстановления от действия сил резания. Силы резания рассчитывались с учетом усадки стружки. Показано, что при обработке новыми пластинами усадка стружки составляет 2,8–3,5. Это приводит к повышению сил резания до 1450 Н и появлению вибраций при чистовых режимах обработки. Использование восстановленных пластин уменьшило усадку до 1,6–2,2, поэтому силы резания снижаются на 70–90 %. Применяемая технология увеличивает срок службы восстановленных пластин в три раза по отношению к покупным пластинам.

Ключевые слова: вторичный ресурс, твердосплавный инструмент, стойкость, режущие пластины, усадка стружки, моделирование, метод конечных элементов, напряжения, режимы резания, опытно-промышленная проверка

STRENGTH ANALYSIS OF RESTORED REPLACEABLE MULTIFACETED PLATES

Trofimenko N.G., PhD student

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

The paper presents the results of the use of reconstituted carbide plates. A method for calculating plates for FEM strength after recovery from the action of cutting forces is proposed. The cutting forces were calculated taking into account the shrinkage of the chips. It is shown, when processing with new plates, the chip shrinkage is 2,8–3,5. This leads to an increase in cutting forces up to 1450 N and the appearance of vibrations during finishing. The use of reconstituted plates has reduced shrinkage to 1,6–2,2, so cutting forces are reduced by 70–90 %. The applied technology increases the service life of the refurbished plates by 3 times in relation to the purchased plates.

Keywords: secondary resource, carbide tool, durability, cutting plates, chip shrinkage, modeling, finite element method, stresses, cutting modes, pilot testing

Сменные многогранные пластины (СМП) широко применяются при токарной обработке деталей на станках с ЧПУ благодаря универсальности и высоким физико-механическим свойствам [1]. В этом случае ресурс работы СМП зависит только от количества режущих вершин, которые ограничиваются одноразовым применением. Обоснована технология переточки СМП с позиции прочностного анализа и САЕ-расчетов. Вопросы увеличения ресурса работы СМП при механической обработке связаны с возможностью повышения стойкости пластин [2, 3]. На рис. 1 показана типичная геометрия СМП толщиной 4,76 мм, а на рис. 2 – восстановленная пластина после переточки толщиной 4,06 мм.

Анализ способов восстановления показал, что наибольшая эффективность восстановления была получена при использовании переточки по передней поверхности. Особенность предложенной технологии заключается в том, что при заточке по передней поверхности толщина пластины уменьшалась на 0,3–1,0 мм. В связи с этим необходимо исследовать прочность пластин после восстановления при черновых режимах точения и определить

предельные значения толщины пластины. При моделировании прочности СМП решались следующие задачи.

1. Проектировалась САD-геометрия СМП в среде КОМПАС-3D.
2. Создавалась расчетная модель с помощью 3D-конструкции СМП.
3. По формуле (1) определялись силы резания в зависимости от режимов обработки и геометрии пластин.
4. В пакете ANSYS Workbench 2022 R3 строилась конечно-элементная модель СМП.
5. Конечно-элементная модель нагружалась статической силой резания, приложенной к площадке контакта по передней поверхности, и определялись соответствующие напряжения.

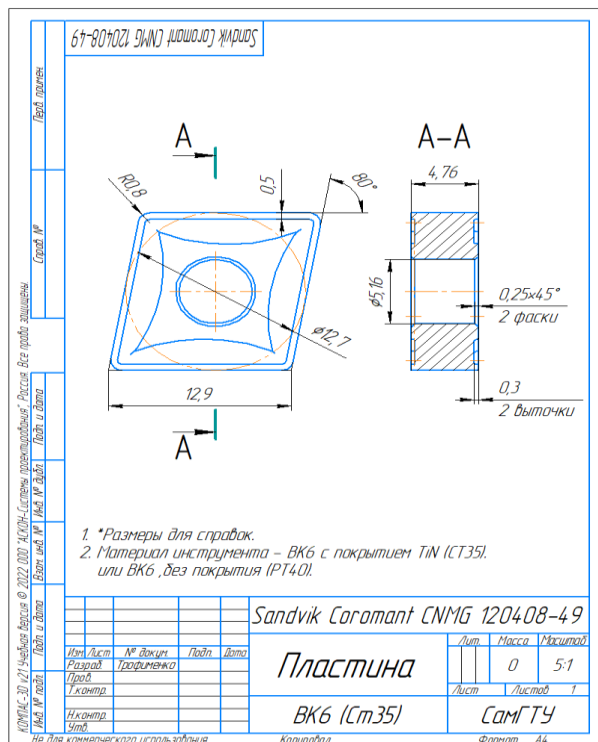


Рис. 1. Рабочий чертеж СМП, полученный путем реверсивного инжиниринга



Рис. 2. Восстановленная пластина

Важной частью моделирования прочности СМП является определение силы резания при точении. Анализ расчетных зависимостей показал, что в общем случае наиболее близкие результаты к экспериментальным данным дают зависимости, приведенные в рекомендациях компании Sandvik Coromant [4]. Для определения силы резания P_z предложена формула, которая учитывает не только свойства материалов и режимы обработки, но и усадку стружки:

$$P_z = K_y \times K_c \times S \times t, (\text{МПа}), \quad (1)$$

где S – подача на оборот, мм/об;

t – глубина резания, мм;

K_c – удельная сила резания, Н/мм²;

K_y – коэффициент усадки стружки.

Схема механической обработки, полученная при инженерном анализе всех элементов инструментальной системы, приведена на рис. 3.

Исследование усадки стружки проводилось при точении стали 45 НВ 200 на токарном станке 1К62 с режимами: $V_p = 150$ м/мин, $s = 0,34$ мм/об, $t = 1,0$ мм.

При этом применялись следующие инструменты:

1. Твердосплавная сменная пластина CNMG 120408 CT35 с трёхкомпонентным покрытием ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$).

2. Переточенная твердосплавная сменная пластина CNMG 120408 PT40.

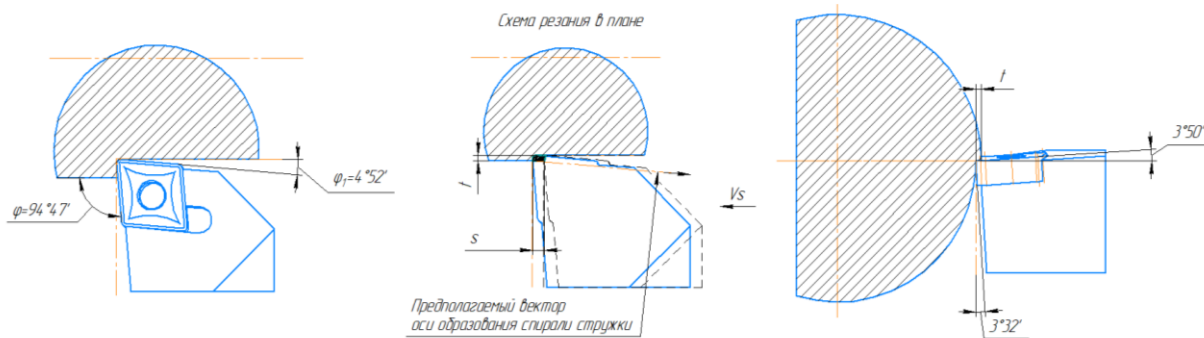


Рис. 3. Схема взаимодействия СМП с поверхностью

Исследованиями установлено, что при точении новыми пластинами усадка стружки составляет от 2,8 до 3,6. Это говорит о больших силах и температурах резания, связанных с отрицательными передними углами на упрочняющей кромке (шириной 0,2–0,3 мм) $\gamma_1 = -(15-20)^\circ$, особенно при чистовых режимах резания (рис. 4). Сравнение значений коэффициента усадки в зависимости от режимов точения новыми и восстановленными пластинами показало, что силы резания после восстановления уменьшились с 1475 Н до 870 Н.

На основании расчетных данных (формула 1) определялось напряжения на передней поверхности пластины в зависимости от режимов резания (см. таблицу). Исследованиями установлено, что предельное количество переточек одной вершины не может быть больше 3.

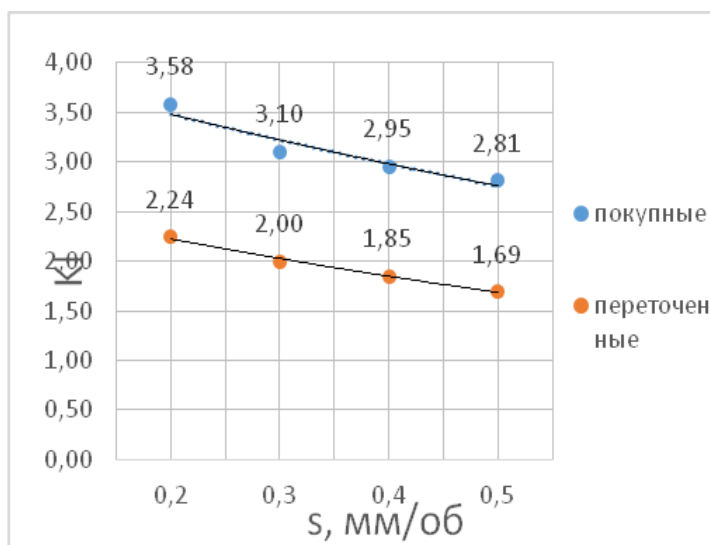


Рис. 4. Зависимость коэффициента усадки стружки от подачи ($t = 0,5$ мм; $V_p = 200$ м/мин)

Экспериментальные исследования проводились при чистовом точении стали 38ХМЮА на токарно-карусельном станке с ЧПУ 1А512Ф3 с режимами: $V_p = 160$ м/мин, $t = 0,5$ мм, $S_0 = 0,2$ мм/об, работа с охлаждением – эмульсия [4]. Стойкость пластин определялась по формуле

$$P_i = P_{ir} \cdot (1 + i \cdot \xi), \quad (2)$$

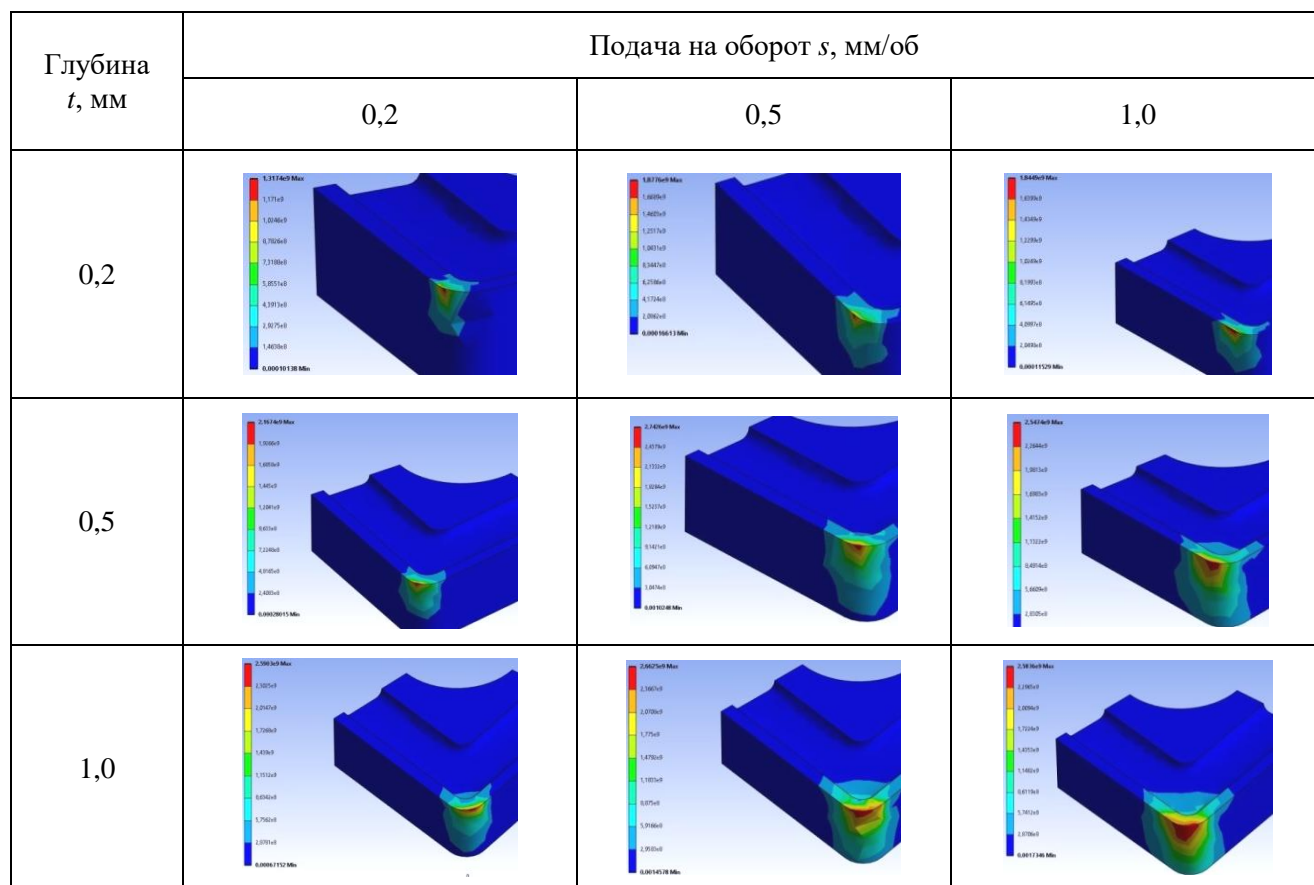
где P_{ir} – стойкость одной вершины новой пластины в час;

i – число переходов при восстановлении;

ξ – коэффициент снижения стойкости пластины ($\xi = 0,8$).

Величина i определялась через предельную толщину пластины, полученную при моделировании прочности. Расчеты показали, что эта величина составила 2,5 мм, т. е. при величине переточки 0,35 мм количество переточек не может быть больше 3.

**Напряженно-деформированное состояние МНП CNMG 120408-49 BK6 (CT35)
под действием статической нагрузки, соответствующей режимным параметрам резания**



При $P_{ir} = 20$ час/верш:

$$P_i = 20 \cdot (1 + 3 \cdot 0,8) = 64 \text{ ч.}$$

Таким образом, по сравнению с новой пластиной ресурс восстановленного инструмента увеличился более чем в три раза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скуратов, Д.Л. Формообразование поверхностей деталей. Обработка материалов резанием: учеб. пособие / Д.Л. Скуратов, В.Н. Трусов, Т.Н. Андрухина. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 175 с.
2. Попова, А.Ю. Повышение эффективности использования современных инструментов со сменными твердосплавными пластинами за счет их вторичного ресурса / А.Ю. Попова, Д.С. Радченко, Е.В. Васильева // Вестник УГАТУ. – Уфа, 2012. – Т. 16, № 4. – С. 46–51.
3. Использование вторичного ресурса твердосплавных сменных многогранных пластин в металлообработке / П.В. Татанов, А.Р. Яньюшкин, К.Т. Шеров, А.С. Яньюшкин // Наука и техника Казахстана. – 2021. – № 1. – С. 85–96. – ISSN 1680-9165.
4. Балакиров, С.Н. Разработка технологии восстановления сменных твердосплавных пластин / С.Н. Балакиров, Н.В. Носов // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. – 2018. – Т. 20, № 4 (2). – С. 165–169.

Секция 2. ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

УДК 004.94 + 536.33 + 621.373.826:621.78

СТРУКТУРА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Антошин И.А.¹, аспирант, **Яреско С.И.**^{1,2}, д.т.н., зав. лабораторией СФ ФИАН,
Девойно О.Г.³, д.т.н., профессор

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² Самарский филиал ФИАН, г. Самара, Российская Федерация

³ Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»,
г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: ilyaantoshin16@mail.ru, e-mail: serg19541959@mail.ru

Описана структура проекта построения 3D-модели расчета остаточных напряжений и температурного поля при лазерной обработке двухслойной твердотельной структуры. Для построения модели было использовано программное обеспечение ANSYS Workbench совместно с утилитой Moving Heat Source V4.1 в качестве инструмента для моделирования движущегося источника тепла.

Ключевые слова: конечно-элементный анализ, лазерная обработка, температурное поле, остаточные напряжения, карбид вольфрама

STRUCTURE OF A FINITE ELEMENT MODEL FOR CALCULATION RESIDUAL STRESSES DURING LASER HEAT TREATMENT OF TWO-LAYER STRUCTURES

Antoshin I.A.¹, PhD student, **Yaresko S.I.**^{1,2}, Grand PhD in Engineering Sciences,
Head of the Laboratory for Laser-Induced Processes,
Devoyno O.G.³, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

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

³ Branch of BNTU "Research Polytechnic Institute", Minsk, Republic of Belarus

E-mail: ilyaantoshin16@mail.ru, e-mail: serg19541959@mail.ru

The structure of constructing project of 3D model for calculating residual stresses and temperature field during laser processing of a two-layer solid-state structure is described. To build the model ANSYS Workbench software was used together with the Moving Heat Source V4.1 utility as a tool for modeling a moving heat source.

Keywords: finite element analysis, laser processing, temperature field, residual stresses, tungsten carbide

Высокие эксплуатационные характеристики изделия/детали после лазерной обработки (ЛО) можно получить в результате оптимизации режимов упрочнения, принимая во внимание распределение температуры в зоне лазерного воздействия (ЗЛВ) и его изменение во времени. Знание температурного поля позволяет определить такие важные параметры процесса ЛО, как скорости нагрева и охлаждения, температурные градиенты по различным направлениям, размеры зон фазовых превращений, правильно выбрать энергетические и временные характеристики лазерных источников и оптимальные режимы их работы.

Общий характер распределения температуры в процессе ЛО можно установить с помощью решения дифференциального уравнения теплопроводности, описывающего

распределение тепла в металлах и сплавах. Необходимость решения уравнения теплопроводности возникает в задачах, целью которых является исследование воздействия лазерного излучения на материал для определения темпа изменения температуры во время воздействия, а после его окончания – пространственного распределения и градиентов температуры. Однако теоретическое определение скоростей нагрева и охлаждения, градиентов температуры по разным направлениям, а также остаточных напряжений, возникающих в процессе ЛО, является трудоемким процессом.

Для решения задач, описанных выше, используются как аналитические методы, так и численное моделирование методами конечно-элементного (КЭ) анализа, которые позволяют моделировать теплофизические процессы при ЛО металлов и сплавов, рассчитывать параметры ЗЛВ [1–5]. Известно решение подобных задач при импульсной лазерной термообработке режущего инструмента [6]. Также имеется опыт применения КЭ анализа для расчета остаточных напряжений в различных материалах и сплавах [7–9]. Применение КЭ моделирования позволяет не только рассчитать распределение температуры в процессе ЛО, но и разработать методики выбора технологических параметров процесса лазерного упрочнения.

Цель работы – построение КЭ модели расчета остаточных напряжений при термообработке двухслойной структуры движущимся непрерывным лазерным источником.

В работе для расчета остаточных напряжений при непрерывной ЛО используется КЭ моделирование в среде ANSYS Workbench. При разработке КЭ модели расчета остаточных напряжений соблюдается следующая процедура:

1. Создание двухслойной 3D-модели, представляющей собой два простейших объема с соответствующими физико-механическими свойствами, например плотностью, пределом текучести, коэффициентом линейного расширения, а также со своими геометрическими размерами.

2. Назначение движущегося источника тепла с присущими ему интенсивностью излучения, радиусом пятна и скоростью движения. Для упрощения и оптимизации моделирования движения источника тепла совместно с ПО ANSYS Workbench используется модуль Moving Heat Source V4.1.

3. Обеспечение выполнения основных условий построения модели, а именно назначение плоскости симметрии, построение КЭ сетки с максимальным сгущением элементов к траектории движения источника тепла, назначение коэффициентов конвекции.

Геометрическая 3D-модель представляет собой половину образца с размерами 50×20×5 мм из конструкционной стали 38ХМА, на одну из поверхностей которого нанесено покрытие на основе карбида вольфрама толщиной 0,3 мм, каждому из двух тел заданы свойственные ему наборы физико-механических свойств (см. таблицу).

Физико-механические свойства исследуемых материалов

| Плотность, кг/м ³ | Предел текучести, МПа | Модуль упругости, МПа | Коэффициент Пуассона | Теплопроводность, Вт/(м·град) | Удельная теплоемкость, Дж/(кг·град) |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Сталь 38ХМА | | | | | |
| 7850 | 650 | 2·10 ⁵ | 0,28 | 38 | 525 |
| Покрытие на основе WC | | | | | |
| 15770 | 1000 | 6,3·10 ⁵ | 0,224 | 29,3 | 35,74 |

Процесс расчета остаточных напряжений в образце с покрытием после ЛО условно разделен на три этапа (рис. 1).

На первом этапе проводится расчет остаточных напряжений в стальной подложке, которые возникают после стандартной термической обработки материала. Нагрузка на этом этапе представляет собой нагрев образца до 650 °С (рис. 2, а) с последующим охлаждением на воздухе до температуры окружающей среды (рис. 2, б). На данном этапе можно установить

наличие/возникновение пластической деформации в образце при объемной термической обработке. После расчета полученные показатели импортируются во второй этап в качестве исходных данных.

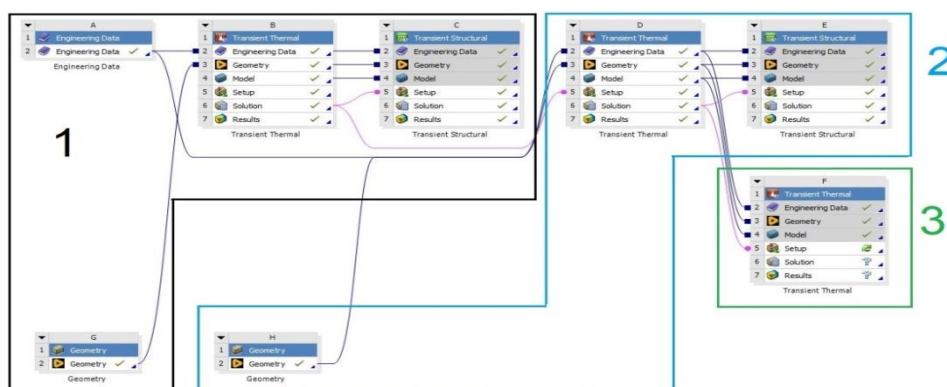
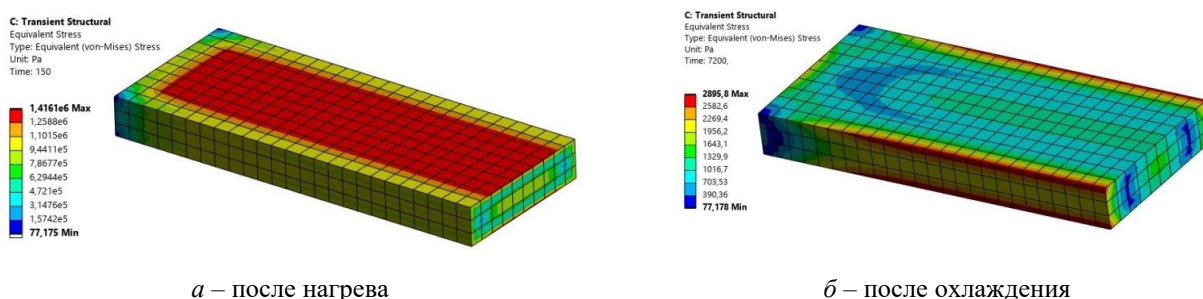


Рис. 1. Структура проекта расчета остаточных напряжений в процессе ЛО



а – после нагрева

б – после охлаждения

Рис. 2. Распределение напряжений в стальной подложке при стандартной термообработке

Второй этап необходим для расчета напряжений, возникающих в процессе напыления покрытия на основе WC. При решении данной задачи учитывается распределение остаточных напряжений, сформировавшихся при объемной термообработке. Согласно технологии напыления, при нанесении покрытия образец не должен нагреваться выше 150 °С, так как высокие температуры ведут к появлению высоких остаточных напряжений, оказывающих отрицательное влияние на прочность покрытия. При охлаждении в перегретом покрытии возникают трещины и сколы. На данном этапе модель рассматривается в виде двухслойной структуры, состоящей из двух объемов, один из которых представляет собой подложку из стали 38ХМА, а другой – покрытие WC-10Co-4Cr. Остаточные напряжения фиксируются после завершения процесса напыления и охлаждения до температуры окружающей среды (рис. 3).

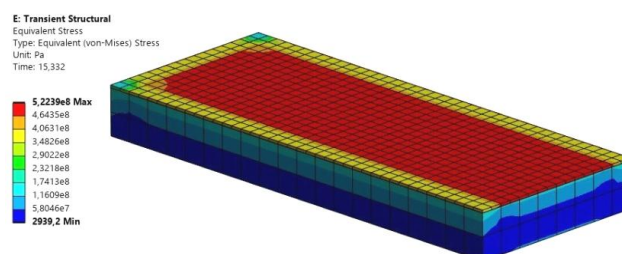


Рис. 3. Распределение напряжений после напыления покрытия на основе WC

Как и ранее, на данном этапе можно установить возникновение/наличие пластической деформации в покрытии при его нанесении. Полученные результаты после завершения расчета импортируются в третий этап в качестве исходных данных.

На третьем этапе с учетом полученных ранее результатов моделируется процесс ЛО описанной двухслойной структуры для определения влияния лазерного излучения на распределение температуры в ЗЛВ (рис. 4) и остаточных напряжений, сформированных в процессе нанесения покрытия и его лазерной постобработки.

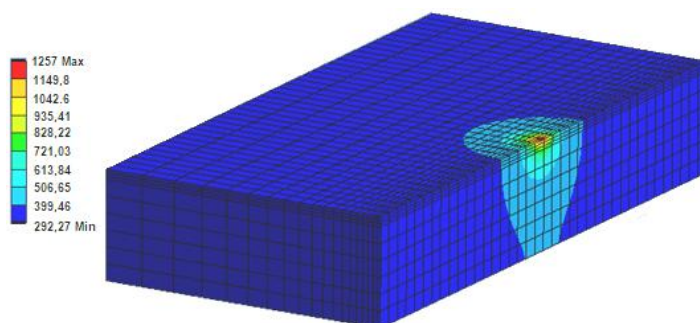


Рис. 4. Распределение температуры в ЗЛВ

Итак, предложена структура проекта построения 3D-модели расчета остаточных напряжений и температурного поля при лазерной постобработке двухслойной твердотельной структуры, состоящей из стальной подложки и покрытия на основе карбида вольфрама. Ожидается, что реализация предложенного проекта позволит определить оптимальные режимы ЛО покрытия, нанесенного на стальную подложку, при которых глубина зоны упрочнения максимальна, а формирующиеся при этом в покрытии остаточные напряжения не превышают предела текучести. Необходимым и достаточным условием адекватности модели является ее экспериментальная проверка, определение распределения и знака остаточных напряжений после лазерной постобработки покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шапеев, В.П. Численное моделирование лазерной сварки стальных пластин / В.П. Шапеев, В.И. Исаев, А.Н. Черепанов // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 2. – С. 107–114.
2. Малоков, С.П. Моделирование процесса лазерной обработки сапфира / С.П. Малоков, А.В. Саенко, Ю.В. Клунникова // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 9 (158). – С. 39–45.
3. Прохоров, А.В. Моделирование мощного движущегося источника тепла / А.В. Прохоров // Инновации в науке. – 2013. – № 18–1. – С. 19–24.
4. Красавин, А.Л. Компьютерное моделирование распределения температуры в металлических двухслойных поглотителях при нагреве движущимся источником излучения / А.Л. Красавин, М.Д. Старостенков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 548–554.
5. Кректулева, Р.А. Теплофизические процессы в меди при поверхностном воздействии движущегося источника нагрева / Р.А. Кректулева, Я. Шакан // Сварка и диагностика. – 2011. – № 4. – С. 66–69.
6. Ярьско, С.И. Конечно-элементное моделирование в технологии упрочняющей лазерной обработки металлорежущего инструмента / С.И. Ярьско // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92, № 2. – С. 330–341.
7. Власов, С.Н. Применение САЕ-систем при моделировании напряженного состояния инструментальной композиции / С.Н. Власов, Р.Р. Багаутдинов // Вестник науки и образования. – 2017. – Т. 1, № 12 (36). – С. 29–33.
8. Peyre, P. FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels / P. Peyre, I. Chaieb, C. Braham // Modelling and simulation in materials science and engineering. – 2007. – Vol. 15, No. 3. – Pp. 205–221. – DOI: 10.1088/0965-0393/15/3/002.
9. Конечно-элементный анализ остаточных напряжений, возникающих в результате лазерной ударной проковки титанового сплава ВТ6 / О.А. Плехов, А.А. Костина, Р.И. Изюмов, А.Ю. Изюмова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 171–184. – <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.2.13>

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ ПОКРЫТИИ

Болдырева А.С., аспирант, **Носов Н.В.**, д.т.н., профессор

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

Представлены исследования шероховатости поверхности при детонационном покрытии из карбидов вольфрама. Исследования проводились на образцах, на поверхность которых наносилось покрытие из VK12 детонационной пушкой толщиной от 0,1 до 0,3 мм. В результате исследования шероховатости установлено, что наибольшее влияние толщина покрытия оказывает на относительный опорный профиль поверхности при величине $Ra = 3,0-3,4$ мкм. В целом результаты исследования поверхности при детонационном покрытии показывают, что шероховатость при таком методе напыления намного меньше, чем это заложено в технических требованиях долот PDC.

Ключевые слова: долото PDC, детонационное покрытие, твердый сплав, износостойкость, шероховатость, качество поверхности, толщина покрытия, относительная опорная поверхность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (Госзадания) FMRW-2025-0052

INVESTIGATION OF SURFACE ROUGHNESS DURING DETONATION COATING

Boldyreva A.S., PhD student, **Nosov N.V.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

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

This article presents studies of surface roughness during detonation coating of tungsten carbides. The study was carried out on samples on the surface of which a coating of VK12 was applied with a detonation cannon with a thickness of 0,1 to 0,3 mm. As a result of the study of roughness, it was found that the thickness of the coating has the greatest effect on the relative reference profile of the surface, with a value of $Ra = 3,0-3,4$ microns. In general, the results of the study of the surface during detonation coating show that the roughness with this method of spraying is much less than it is laid down in the technical requirements of the PDC chisels.

Keywords: PDC chisel, detonation coating, hard alloy, wear resistance, roughness, surface quality, coating thickness, relative bearing surface

The work was carried out with the framework of the government order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FMRW-2025-0052)

Установлено, что качество поверхности играет важную роль в жизненном цикле изделия. Именно такие важные параметры, как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость, точность сопряжений, контактная жесткость и герметичность соединений зависят от качества поверхности, поэтому в технологические процессы включаются различные методы обработки и упрочнения поверхности [1].

Бутовые алмазные долота PDC работают в агрессивных средах и находятся в контакте с породой, вследствие чего испытывают высокие нагрузки при бурении. Для обеспечения нормальной работы долота его корпус покрывается твердым сплавом, который повышает износостойкость изделия и обеспечивает оптимальный ресурс.

На данный момент большинство долотных предприятий применяют метод механической наплавки порошка ВК12 с помощью газовой горелки [2]. При таком трудоемком процессе качество покрытия поверхности корпуса долота не соответствует техническим условиям (трещины, низкая шероховатость, наличие концентраторов напряжений и др.), что влияет на ресурс работы долота.

Для улучшения качества поверхности и повышения эффективности долота предлагается заменить наплавку детонационным методом нанесения твердосплавного покрытия, которое известно своей высокой адгезией, низким износом и коэффициентом трения [3].

При нормировании шероховатости как в отечественной промышленности, так и за рубежом наибольшее распространение получил параметр Ra . Параметр Rz нормируется в тех случаях, когда прямой контроль параметра не представляется возможным, например, для поверхностей, имеющих малые размеры или сложную конфигурацию. Параметр $Rmax$ нормируется в тех случаях, когда необходимо оценить наличие рисок как концентраторов напряжения для обеспечения статической и усталостной прочности деталей машин.

Относительная опорная длина профиля больше всего влияет на эксплуатационные свойства, характеризуя фактическую опорную площадь поверхности долота и породы [4]. Увеличение длины опорного профиля способствует улучшению эксплуатационных свойств поверхности, так как это уменьшает контактные напряжения в зоне контакта.

Большое влияние на шероховатость поверхности оказывают размер и марка порошка. Анализ структуры и трибологических свойств износостойких детонационных покрытий проводился Ульяничкиным, Штерцером и Злобиным [5]. Они исследовали сплавы ВК25, Diamalloy 2004 (WC/Co 88/12 %), Mechanomade 301 (WC/Co 88/12 %), Diamalloy 2005 NS (WC/Co 83/17 %), комплексный карбид Cr/Ti/C+ нихром (75/25 %), молибден.

В результате самым износостойким и универсальным оказался сплав Diamalloy 2004 (WC/Co 88/12 %) благодаря своему составу: с уменьшением содержания кобальта растет сопротивление карбидовольфрамовых сплавов абразивному износу и износу трением.

У сплава Diamalloy 2004 (WC/Co 88/12 %) существует отечественный аналог ВК12, который и был применен в данном исследовании.

Напыление проводилось на детонационной пушке ССДС2000 под углом 90° на расстоянии 50 мм до образца со скоростью 90–100 м/с, размер порошка 30–50 мкм. Диаметр пятна контакта равен диаметру сопла и составляет 10 мм. Покрытие наносилось на четыре образца с различной толщиной: без покрытия, только пескоструйная обработка; толщина покрытия 0,1 мм; толщина покрытия 0,2 мм; толщина покрытия 0,3 мм.

Требуемая толщина регулируется количеством напыляемых слоев путем перекрытия пятен контакта.

В процессе экспериментального исследования изучены способы перекрытия пятен при детонационном покрытии (рис. 1).

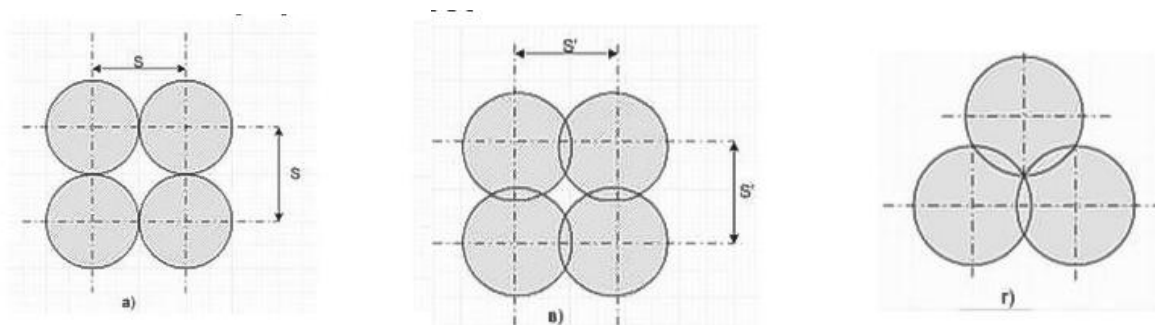


Рис. 1. Компоновка пятен контакта при нанесении покрытия:

a – без перекрытия кубическая; b – с перекрытием кубическая;
 g – с перекрытием гексагональная

При нанесении покрытий применялась гексагональная упаковка. При этом на одно пятно наносилось пять слоев, которые обеспечивало толщину пятна 0,09–0,1 мм, затем детонационная пушка перемещалась на величину диаметра контакта с коэффициентом перекрытия, равным 0,7–0,8, и производилось образование следующего пятна контакта. После нанесения одного слоя толщиной 0,1 мм процесс повторялся, формируя толщину 0,2 и 0,3 мм.

Оценка шероховатости поверхности покрытия производилась на стационарном измерительном комплексе «Абрис ПМ7» (рис. 2).

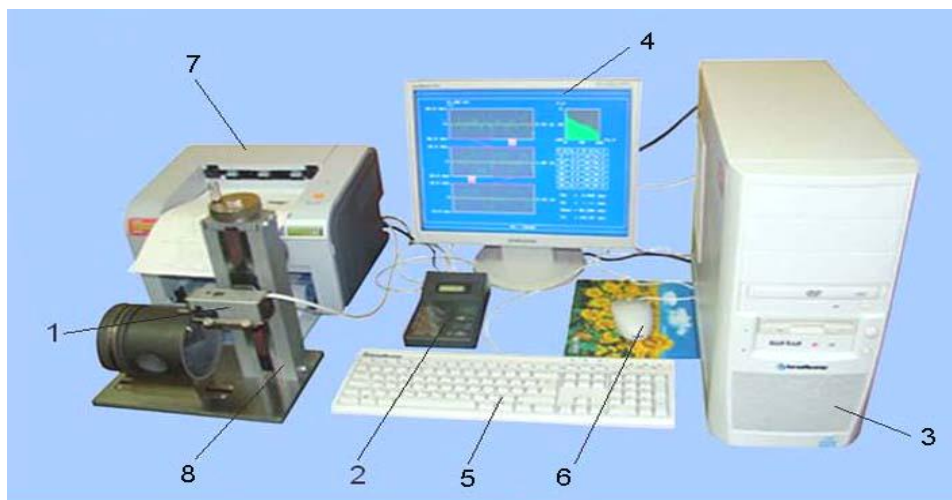


Рис. 2. Внешний вид стационарного измерительного комплекса «Абрис ПМ7»:

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

Исследования проводились на образцах до и после обработки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. До покрытия поверхность образцов обрабатывалась на пескоструйной установке для достижения шероховатости профиля не ниже $Ra = 3,5$ мкм. Шероховатость корпуса долота не должна превышать $Ra = 12,5$ мкм.

На каждом образце было сделано по 10 замеров, полученные средние значения параметров Ra , Rz , $Rmax$, Sm , tp сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Исследование шероховатости в перпендикулярном направлении

| Параметры шероховатости | Толщина покрытия | | | |
|--------------------------|------------------|--------|--------|--------|
| | без покрытия | 0,1 мм | 0,2 мм | 0,3 мм |
| Увеличение Y | 10270 | 4124 | 4415 | 4547 |
| Увеличение X | 84 | 84 | 84 | 84, |
| Ra , мкм | 1,2 | 3,4 | 3,3 | 3,5 |
| Rz , мкм | 7,0 | 15,8 | 15,6 | 15,7 |
| $Rmax$, мкм | 9,0 | 23,4 | 21,8 | 21,1 |
| Sm , мкм | 81,4 | 143,2 | 135,6 | 167,2 |
| tp , %, при $p = 25$ % | 11,6 | 8,4 | 8,8 | 19,2 |

По результатам исследования видно, что при детонационном покрытии величина Ra повышается с 1,2–1,5 мкм до 3,5 мкм. Увеличение толщины покрытия с 0,1 до 0,3 мм практически не влияет на высотный параметр Ra , так как на этот параметр влияет размер напыляемого порошка и плотность потока частиц.

Установлено, что средний шаг по средней линии (S_m) при увеличении толщины покрытия повышается на 5–7 %. Это связано с тем, что плотность частиц порошка с повышением толщины покрытия уменьшается.

Таблица 2

Исследование шероховатости в продольном направлении

| Параметры шероховатости | Толщина покрытия | | | |
|--------------------------|------------------|--------|--------|--------|
| | без покрытия | 0,1 мм | 0,2 мм | 0,3 мм |
| Увеличение Y | 10387 | 5249 | 4790 | 4277 |
| Увеличение X | 84 | 84 | 84 | 84 |
| Ra , мкм | 1,4 | 2,8 | 3,4 | 3,4 |
| Rz , мкм | 7,5 | 13,9 | 15,3 | 16,3 |
| R_{max} , мкм | 9,7 | 19,3 | 20,2 | 23,3 |
| S_m , мкм | 90,8 | 126,8 | 170,6 | 156,6 |
| tp , %, при $p = 25$ % | 13,8 | 8,4 | 12,6 | 12,8 |

Исследования показали, что с увеличением толщины слоя относительная опорная длина профиля (tp) при $p = 25$ % повышается (согласно среднему значению примерно в два раза), что является положительным показателем.

В целом результаты исследования поверхности при детонационном покрытии показывают, что шероховатость при таком методе напыления намного меньше, чем это заложено в технических требованиях долот PDC. Это является преимуществом при бурении, так как высокая шероховатость способствует более интенсивному износу рабочих элементов долота, то есть снижению эффективности разрушения пород; также в результате исследований установлено, что чем больше толщины покрытия, тем выше значение относительной опорной длины профиля, т. е. с увеличением толщины слоя повышается износостойкость покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Березин, М.А. Теоретическое исследование влияния шероховатости поверхности контртела на работоспособность неподвижных уплотнительных соединений / М.А. Березин // Агропромышленные технологии Центральной России. – 2023. – № 1 (27). – С. 137–143.
2. Болдырева, А.С. Электрофизические методы обработки в современной промышленности / А.С. Болдырева, Н.В. Носов // Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь, 2023. – С. 81–84.
3. Мажитов, К.К. Исследование шероховатости поверхности покрытий из молибдена, полученных методом магнетронного распыления, проводилось интерферометрическим методом с использованием лазерного микроскопа МИМ-340 / К.К. Мажитов // Актуальные проблемы современной науки. – Омск: Омский государственный технический университет, 2016. – С. 29–33.
4. Леонов, О.А. Относительная опорная длина профиля поверхности и долговечность деталей / О.А. Леонов, Ю.Г. Вергазова // Инновационная наука. – РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. – 2016. – № 1–2 (13). – С. 81–83.
5. Структура и трибологические свойства износостойких детонационных покрытий / В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер, С.Б. Злобин, Рао Д. Сриниваса, Г. Сундараджан // Физическая мезомеханика. – Новосибирск, Хайдарабад, Индия: Сибирское отделение РАН, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. – 2006. – № 9 (4). – С. 87–92.

«ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК» УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

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

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

Предлагается проект разработки «цифрового двойника» учебной лаборатории. В качестве направления для повышения эффективности подготовки студентов рассмотрена возможность использования виртуальных лабораторных работ. Представлены преимущества и недостатки использования виртуальных лабораторных работ в учебном процессе, а также основные этапы создания онлайн-платформы с размещенным «цифровым двойником» лаборатории.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, лабораторная работа, виртуальная реальность, учебная лаборатория, цифровой двойник, 3D-симулятор, VR-тренажер

THE DIGITAL TWIN OF THE TRAINING LABORATORY

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

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

The paper proposes a project to develop a digital twin of an educational laboratory. The possibility of using virtual laboratory facilities has been considered as a way to improve the effectiveness of student training. The advantages and disadvantages of using virtual laboratory work in the educational process, as well as the main stages of creating an online platform, are considered.

Keywords: computer modeling, laboratory work, virtual reality, educational laboratory, digital twin, 3D-simulator, VR-trainer

В настоящее время многие организации внедряют в свою работу такие технологии, как «цифровые двойники». Это виртуальная копия объекта, группы объектов или процессов с возможностью моделирования и анализа их работы. Виртуальная лаборатория представляет собой программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить эксперименты без непосредственного контакта с реальным оборудованием или при полном отсутствии такового [1].

Программная виртуальная лаборатория – это компьютерная реализация математической модели изучаемого явления или устройства, виртуальные инструменты для задания параметров и визуализации значений измеряемых величин, средства планирования эксперимента, сбора и обработки полученных результатов [2].

Предлагаем использовать «цифровой двойник» учебной лаборатории металлорежущих станков в учебном процессе подготовки студентов направлений 15.03.01 «Машиностроение» и 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты».

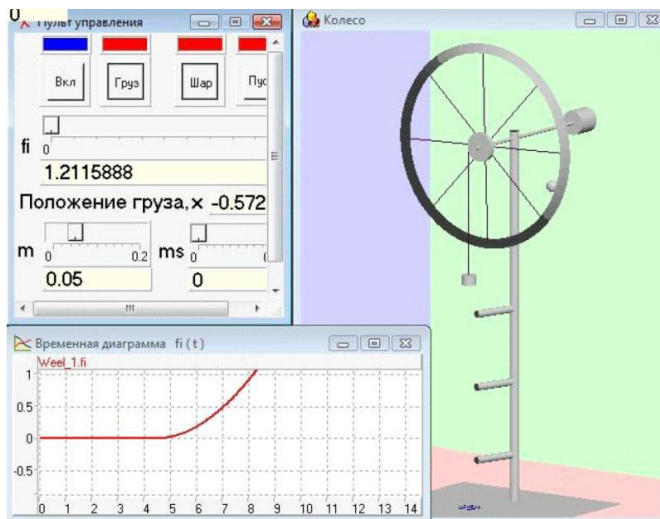
Основной целью создания «цифрового двойника» учебной лаборатории является перевод традиционной лаборатории на новый уровень технологий, соответствующий современному уровню развития техники в области машиностроения.

«Цифровой двойник» учебной лаборатории позволит точно копировать реальную работу учебной лаборатории и включает набор лабораторных работ в виде тренажеро-имитаторов, 3D-симуляторов, VR-тренажеров и интерактивных комплексов (рис. 1), в том числе и проводимых на актуальном для предприятий Самарской области высокотехнологичном оборудовании.



a

б



в

Рис. 1. Виртуальные лабораторные работы:

a – 3D-симулятор, *б* – VR-тренажер, *в* – интерактивный комплекс

«Цифровой двойник» учебной лаборатории актуален для образовательного учреждения и позволит решить следующие задачи:

- повышение качества подготовки и уровня квалификации студентов;
- расширение базы приобретаемых студентами компетенций;
- расширение лабораторной базы и перечня проводимых работ;
- безопасное обучение студентов работе со сложным оборудованием без риска повреждений или поломок;
- моделирование процессов, протекание которых принципиально невозможно в лабораторных условиях;
- адаптация студентов к будущей профессиональной деятельности на предприятии (за счет моделирования работы оборудования, аналогичного оборудованию, имеющемуся на предприятиях);
- популяризация машиностроительных направлений подготовки студентов и привлечение будущих абитуриентов.

Для размещения «цифрового двойника» лаборатории также планируется разработать онлайн-платформу, интегрированную в сайт вуза, через которую пользователи смогут получить доступ к лабораторным работам.

Пользователями онлайн-платформы могут быть: административный персонал вуза и преподаватели, которым важен мониторинг и оптимизация работы лаборатории; студенты, которые могут осваивать лабораторные работы дистанционно, а потом проводить эксперименты на реальном оборудовании, а также выполнять лабораторные работы на оборудовании, которого нет в лаборатории, но будет на предприятии и имеется его виртуальная копия, и абитуриенты, которые могут воспользоваться экскурсией в лабораторию и познакомиться со своей будущей профессиональной деятельностью.

Можно выделить следующие основные возможности онлайн-платформы:

1. Изучение виртуальных лабораторных работ студентами дневного обучения при подготовке к ним (возможно и удаленно).
2. Выполнение виртуальных лабораторных работ студентами дневного обучения (кроме тех работ, которые проводятся на реальном оборудовании).
3. Выполнение виртуальных лабораторных работ студентами дневного обучения при отработках пропущенных занятий.
4. Выполнение виртуальных лабораторных работ дистанционно студентами заочного обучения.
5. Изучение виртуальных лабораторных работ вновь трудоустроенными преподавателями с целью знакомства с ними.
6. Организация виртуальной экскурсии по лаборатории для абитуриентов.

Для создания онлайн-платформы необходимо выполнение следующих этапов (рис. 2):

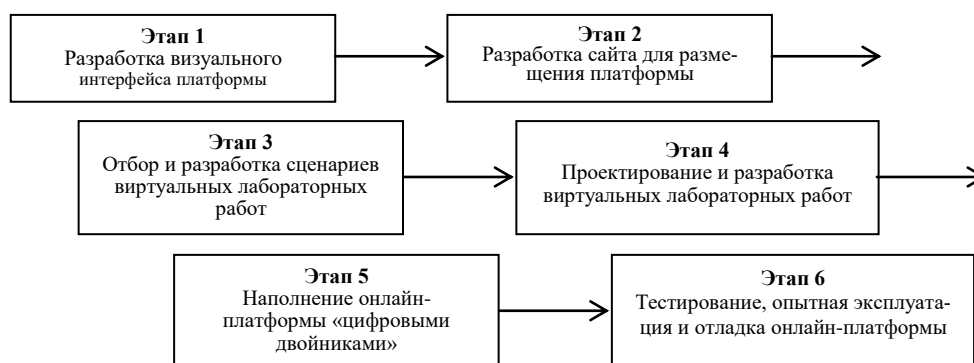


Рис. 2. Этапы создания онлайн-платформы

К сожалению, количество существующих на данный момент виртуальных лабораторий, применяющихся в учебном процессе, довольно мало [1]. Это связано в первую очередь с дорогостоящей их разработки, что приводит к следующим последствиям:

– виртуальные лаборатории, разработанные профессиональными программистами, дизайнерами и специалистами в моделируемой области, стоят очень дорого, что мешает их широкому распространению;

– с другой стороны, малые возможности распространения создают малые стимулы для их производства.

Несмотря на то, что «цифровым двойникам» учебных лабораторий присущи некоторые недостатки, они необходимы в образовательном процессе, так как способствуют формированию актуальных профессиональных компетенций и обладают гибкостью в отношении меняющихся запросов рынка. Не стоит забывать и о том, что опыт работы с реальным оборудованием и приборами тоже необходим, поэтому разумным решением будет сочетание использования реальных и «цифровых» лабораторий в образовательном процессе с учетом присущих им достоинств и недостатков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трухин, А.В. Об использовании виртуальных лабораторий в образовании / А.В. Трухин // Открытое и дистанционное образование. – 2002. – № 4 (8). – С. 81–82.
2. Сениченков, Ю.Б. Виртуальные лаборатории: использование, разработка, стандартизация / Ю.Б. Сениченков // Компьютерные инструменты в образовании. – 2022. – № 3. – С. 108–132.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАЛИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ СОСТАВАМИ

Дурыманов Н.В.^{1,2}, аспирант, Ибатуллин И.Д.¹, и.о. заведующего кафедрой, д.т.н.

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² ООО «Промсенсор», г. Самара, Российская Федерация

E-mail: durymanov.nik@mail.ru

Рассматриваются современное состояние и проблемы обеспечения безопасности при транспортировке нефтепродуктов железнодорожным транспортом. Представлена разработка новой конструкции вагонного замедлителя с автоматической системой управления, обеспечивающей адаптивное торможение и снижение рисков аварийных ситуаций. Описаны использование амортизационно-демпфирующей жидкости, конструктивные особенности и преимущества технологии. Предложенные решения способствуют повышению надежности перевозок, снижению эксплуатационных затрат и улучшению экологической безопасности железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: железнодорожные перевозки, нефтепродукты, вагонный замедлитель, безопасность транспортировки

ENHANCING SAFETY LEVELS IN THE TRANSPORTATION OF PETROLEUM PRODUCTS BY RAILWAY TRAINS

Durymanov N.V.^{1,2}, PhD student, Ibatullin I.D.¹, Acting Head of the Department, Grand PhD in Engineering Sciences

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

² LLC "Promsensor", Samara, Russian Federation

E-mail: durymanov.nik@mail.ru

The article examines the current state and challenges of ensuring safety in the transportation of petroleum products by rail. A new design of a railcar retarder with an automatic control system is presented, providing adaptive braking and reducing the risks of accidents. The structural features, the use of damping hydraulic fluid, and the advantages of the technology are described. The proposed solutions enhance transportation reliability, reduce operational costs, and improve the environmental safety of railway infrastructure.

Keywords: railway transportation, petroleum products, railcar retarder, transportation safety

Согласно данным, приведенным в ОАО РЖД [1, 2], объем погрузки нефтепродуктов на направления Восточного полигона за январь составил 2,3 млн тонн, что демонстрирует рост на 2,1 % по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Особо подчеркивается увеличение объемов транспортировки как на экспорт (на 4,8 %), так и на внутренний рынок (на 0,8 %). Этот положительный тренд подтверждает укрепление роли железнодорожных маршрутов в обеспечении устойчивых поставок нефтепродуктов.

В конце прошедшего года был установлен новый рекорд: количество цистерн, задействованных в перевозках нефтепродуктов, достигло 172,1 тысячи единиц. Этот показатель является исторически максимальным, что подчеркивает высокий уровень востребованности специализированного подвижного состава. Наблюдающийся рост спроса на транспортные мощности отражает стратегическое значение железнодорожного транспорта в условиях перенастройки логистических цепочек [3].

В текущей ситуации, характеризующейся острым дефицитом цистерн для перевозки нефтепродуктов, особое внимание уделяется вопросам их эффективной эксплуатации

и обеспечения безопасности. Поддержание цистерн в надлежащем техническом состоянии становится ключевым фактором для минимизации рисков и предотвращения перебоев в поставках. Решение этих задач позволит повысить надежность транспортных операций и оптимизировать использование существующего парка железнодорожного транспорта.

Для достижения максимального уровня безопасности при работе с вагонопотоками, содержащими цистерны для перевозки нефтепродуктов, необходимо реализовать целостный комплекс мер, направленных на предотвращение потенциальных рисков и инцидентов.

Первой и ключевой задачей является детальный мониторинг технического состояния каждой цистерны. Регулярная диагностика позволяет своевременно выявлять и устранять дефекты, предотвращая утечки, промышленные аварии и обеспечивая экологическую безопасность.

Оснащение сортировочных станций эффективными тормозными системами обеспечивает контроль движения цистерн, особенно на сортировочных горках. Эти технологии плавно снижают скорость и фиксируют вагоны, снижая риск аварий из-за неконтролируемого передвижения.

Не менее важным является обеспечение готовности к возможным чрезвычайным ситуациям, таким как возгорание нефтепродуктов в одной из цистерн. Для таких случаев железнодорожные линии должны быть оборудованы специализированными устройствами, которые позволяют быстро изолировать поврежденную цистерну от остальной части состава. Это предотвращает распространение огня и сводит к минимуму вероятность масштабных разрушительных последствий [3].

Реализация подобных мероприятий, направленных на безопасность и предотвращение рисков, значительно повышает надежность транспортных процессов. Комплексный подход, охватывающий как технические аспекты, так и меры оперативного реагирования, обеспечивает защиту всех участников цепочки перевозок и способствует устойчивому функционированию системы железнодорожного транспорта.

Основным элементом для эффективной переработки вагонопотоков на железнодорожных станциях выступают горочные сортировочные устройства [3]. Они играют ключевую роль в организации движения вагонов, включая цистерны, предназначенные для перевозки нефтепродуктов. Эти цистерны представляют собой крупные резервуары, вместимость которых превышает 26 тонн.

В процессе формирования составов на сортировочных горках вагоны-цистерны могут развивать скорость свыше 5 км/ч. Такое ускорение способно создать риск возникновения аварийных ситуаций, особенно учитывая особенности перевозимого груза. Нефтепродукты, относящиеся к третьей категории по уровню пожарной опасности и токсичности, требуют повышенного внимания к обеспечению их безопасной транспортировки.

Для предотвращения возможных инцидентов особое значение имеет поддержание технической исправности вагонов-цистерн. Регулярный контроль их состояния позволяет минимизировать вероятность утечек или повреждений, которые могут привести к экологическим катастрофам или угрозе для здоровья людей [4].

Принцип функционирования большинства вагонных замедлителей заключается в следующем: гребни колес вагонов периодически взаимодействуют с грибовидными головками замедлителей, вдавливая их вниз. При этом преодолевается сопротивление, создаваемое перемещением гидравлической жидкости из одной полости в другую через дросселирующие отверстия. Когда колесо минует замедлитель, головка возвращается в исходное положение благодаря запасенной в пружине энергии или воздействию сжатого воздуха. Однако энергия, поглощаемая одним устройством, оказывается недостаточной для значительного снижения скорости вагона. Поэтому замедлители устанавливаются группами вдоль рельсов по обеим сторонам пути, образуя последовательности из нескольких десятков устройств, чтобы эффективно справляться с задачей торможения [5–7].

Несмотря на востребованность подобных технологий, подавляющее большинство используемых в настоящее время систем торможения уже давно устарели. Они нередко

обладают конструктивной сложностью и имеют значительные недостатки, что приводит к увеличению затрат на эксплуатацию и снижению общей надежности оборудования.

Одной из ключевых проблем является то, что существующие конструкции действуют как независимые, нерегулируемые поглотители энергии, поглощаемой движущимся вагоном. Отсутствие адаптивности в таких системах значительно ограничивает их эффективность, особенно в условиях современных требований к безопасности и производительности железнодорожной инфраструктуры [5–7].

Для решения вышеперечисленных проблем была разработана и запатентована новая конструкция вагонного замедлителя (см. рисунок).

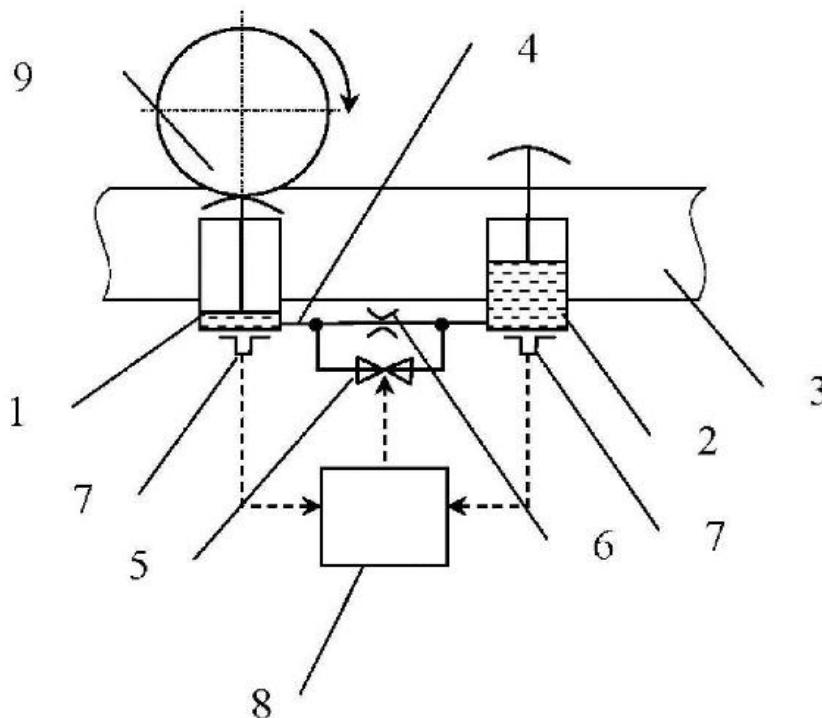


Схема активного точечного замедлителя-толкателя:

- 1 – первый гидроцилиндр, 2 – второй гидроцилиндр, 3 – рельс,
 4 – трубопровод, 5 – регулируемая трубопроводная арматура,
 6 – нерегулируемый гидравлический дроссель, 7 – датчик,
 8 – система автоматического регулирования, 9 – колесо,
 10 – следующее колесо

В основе замедлителя лежат два последовательно установленных на рельсах гидроцилиндра, соединенных трубопроводами с регулируемой арматурой и страховочным дросселем [8]. Каждый цилиндр закреплен таким образом, чтобы исключить возможность одновременного контакта обоих поршней с колесами вагона. В качестве рабочей жидкости используется амортизационно-демпфирующая композиция (АДК), обладающая способностью снижать ударные нагрузки.

При наезде колеса на первый гидроцилиндр поршень опускается, выдавливая жидкость во второй цилиндр и создавая тормозное усилие. Затем процесс повторяется в обратном порядке, обеспечивая равномерное замедление вагона.

Устройство оснащено системой автоматического регулирования, которая получает данные от датчиков, установленных на гидроцилиндрах. Датчики измеряют параметры, такие как давление, температура и скорость движения поршня. Система автоматически регулирует проходное сечение арматуры, изменяя сопротивление жидкости. Это позволяет:

- поддерживать заданный уровень усилия;
- адаптироваться к изменениям скорости движения вагона;
- оперативно реагировать на сигналы аварийной системы или команды оператора.

При необходимости экстренной остановки система управления полностью перекрывает регулируемую арматуру, переводя устройство в режим максимального поглощения энергии. Страховочный дроссель в этот момент обеспечивает необходимое сопротивление перетеканию жидкости, предотвращая повреждение устройства и возможный сход вагона с рельсов.


Конструкция замедлителя упрощена за счет общей гидросистемы и регулируемой арматуры, что снижает сложность сборки и обслуживания. Использование амортизационно-демпфирующей жидкости (АДК) уменьшает расход рабочей жидкости, снижая эксплуатационные затраты. Автоматическая система управления с датчиками минимизирует энергопотребление и предотвращает аварии. Высококачественные материалы и дополнительные датчики обеспечивают долговечность и контроль износа. Управление всеми замедлителями станции позволяет синхронизировать их работу для эффективного потока вагонов.

Исследования подтверждают эффективность новой конструкции замедлителя с автоматическим управлением для безопасной транспортировки нефтепродуктов. Технология снижает риски повреждений и разливов благодаря регулируемой арматуре и амортизационной жидкости. Надежность и адаптивность устройства делают его важным элементом железнодорожной инфраструктуры, требующим дальнейших испытаний и расширения применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коммерсантъ [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5799146> (дата обращения: 19.01.2025).
2. Трансойл [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/Компания:Трансойл> (дата обращения: 19.01.2025).
3. Волощук, Д.А. Повышение безопасности эксплуатации цистерн для транспортировки нефтепродуктов за счет применения активных вагонных замедлителей-толкателей [Электронный ресурс] / Д.А. Волощук, И.Д. Ибатуллин // Ашировские чтения: сб. трудов Всероссийской науч.-практ. конференции. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2023. – С. 165. – ISBN 978-5-7964-2234-2.
4. Маслокова, Ю.В. Анализ условий использования точечных вагонных замедлителей на горках большой мощности / Ю.В. Маслокова, С.В. Карасев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (56). – С. 46–56. – DOI: 10.52170/1815-9262_2021_56_46.
5. Патент № 1138013 Российская Федерация, МПК В61К 7/08. Гидравлический поршневой вагонный замедлитель для торможения железнодорожного подвижного состава / Мойтерс Г., Бушер Х., Фойгтлендер О.; Оpubл. 30.01.1985. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU1138013A3_19850130 (дата обращения: 19.01.2025).
6. Патент № 208793 Российская Федерация, МПК В61К 7/08, В61К 7/02. Вагонный замедлитель / Калинин С.Н.; Оpubл. 13.01.2022, Бюл. № 2.
Патент № 171002, МПК В61К 7/08. Вагонный замедлитель / А.В. Хомутов, М.П. Ульянов, Е.Ф. Чумазин, Н.Н. Соболев; Оpubл. 17.05.2017. – Бюл. № 14.
7. Патент РФ № 2805430 Российская Федерация. Вагонный замедлитель / Ибатуллин И.Д., Кац Н.Г., Леви А.А., Иваняков С.В., Крючков Д.А., Волощук Д.А., Дурыманов Н.В., Парфенов К.В.; Оpubл. 16.10.2023, Бюл. № 29.

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ПРОТЯЖНОГО ИНСТРУМЕНТА ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ


Жилянин Я.А. , ведущий инженер-технолог, **Бабиев Ю.А.**, ведущий инженер-технолог, **Цветков О.П.**, заместитель начальника цеха по технической части

ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Российская Федерация
E-mail: ogt@uec-kuznetsov.ru (с пометкой «Для Жилянина Я.А.»)

Представлены результаты влияния технологии криогенной обработки на структуру быстрорежущей порошковой стали R18MP при изготовлении протяжного инструмента для протягивания пазов типа «ласточкин хвост» в дисках компрессора высокого давления (ВД) из жаропрочного гранулированного сплава на никелевой основе ХН56КВМТЮБ (ВВ751П). Отмечена перспективность применения технологии криогенной обработки для повышения стойкости рабочих поверхностей протяжного инструмента при работе с труднообрабатываемыми материалами, применяемыми в авиационной промышленности.

Ключевые слова: протяжной инструмент, технология криогенной обработки, структура материала

INCREASING TOOL LIFE BY COLD TREATMENT

Zhilyanin Ya.A. , lead engineer-technologist, **Babiev Yu.A.**, lead engineer-technologist, **Tsvetkov O.P.**, Deputy Head of the Workshop for the technical part

UEC Kuznetsov, Samara, Russian Federation
E-mail: ogt@uec-kuznetsov.ru (marked "For Zhilyanin Ya.A.")

The results of the influence of cryogenic processing technology on the structure of high-speed powder steel R18MP in the manufacture of a broaching tool for pulling dovetail grooves in compressor discs are presented made of heat-resistant nickel-based faceted alloy VV751P. The prospects of using cryogenic processing technology to increase the durability of the working surfaces of the broaching tool when working with difficult-to-work materials used are noted.

Keywords: broaching tool, cryogenic processing technology, material structure

С целью снижения массы ротора компрессора ВД одного из изделий производства ПАО «ОДК-Кузнецов» службой генерального конструктора разработано мероприятие по замене материала дисков на никелевый жаропрочный гранулированный сплав ВВ751П. Одной из наиболее сложных операций при изготовлении данных дисков компрессора ВД является операция протягивания пазов.

Протягивание является одним из высокопроизводительных способов механической обработки металлов. Протягивание применяется не только в массовом и крупносерийном производстве, но и в мелкосерийном и даже в индивидуальном. Наружное протягивание применяется вместо фрезерования, строгания и шлифования. При обработке протягиванием решающее значение для результатов работы имеет инструмент, его конструкция и качество изготовления.

Операция протягивания должна обеспечивать требуемые точность размеров и качество поверхности. Все это определяет высокие требования к качеству протяжек, поэтому правильное конструирование протяжки и рациональная технология ее изготовления являются важнейшими для успеха работы [1].

Сплав ВВ751П является труднообрабатываемым, в том числе из-за высокого предела прочности – 1600 МПа. При этом в случае использования протяжек особую значимость имеет

необходимая стойкость инструмента для обеспечения стабильности технологического процесса.

Стойкость режущего инструмента при протягивании является одним из основных параметров, она определяет частоту замены, переточки, переналадки и корректировки, что в свою очередь увеличивает цикл производства, а также повышает вероятность ошибки из-за человеческого фактора. На стойкость режущего инструмента значительно влияют обрабатываемый материал, параметры и режимы обработки.

При изготовлении протяжного инструмента положительно зарекомендовали себя порошковые быстрорежущие стали австрийского производства. Однако приобрести данный материал или его аналог на территории Российской Федерации в нынешних условиях не представляется возможным. При протягивании пазов в дисках из материала ХН62БМКТЮ-ИД стойкость комплекта протяжек из быстрорежущей стали Р18 собственного производства ПАО «ОДК-Кузнецов» между переточкой составляет не менее 105 пазов.

Управлением главного технолога совместно с управлением подготовки производства, а также цехом-изготовителем был учтен опыт других предприятий контура АО «ОДК», обрабатывающих детали из сплава ВВ751П, а именно ПАО «ОДК-Сатурн» и ПАО «ОДК-Пермские моторы». Проведен анализ материалов протяжек, их конструкции, схем и режимов резания.

Для оценки возможности обработки заготовок дисков из сплава ВВ751П организованы и проведены производственные испытания, предусматривающие протягивание пазов типа «ласточкин хвост» на образцах-имитаторах серийными протяжками из стали Р18. Стойкость комплекта серийных протяжек из быстрорежущей стали Р18 составляет 10 пазов до переточки.

Геометрия пазов типа «ласточкин хвост» указана на рис. 1. Допуск на ширину паза равен 0,045 мм, допуски на углы 40° и 70° составляют -4' и ±4' соответственно.

С учетом полученного опыта проведен анализ современных технологий инструментального производства. По результатам проработки решено изготовить протяжки из быстрорежущей порошковой стали Р18МП с применением технологии криогенной обработки или обработки холодом.

Криогенная обработка – это термическая обработка металла сверхнизкими температурами. Криогенная обработка относится к способам направленного изменения структуры материала.

Во многих сортах стали в закаленном состоянии содержится повышенное количество остаточного аустенита. Охлаждение металла ниже точки мартенситного превращения вызовет преобразование аустенита в мартенсит. Увеличение количества мартенсита повышает твердость, увеличивает объем, наращивает магнитные характеристики и стабилизирует размеры. Эти изменения тем значительнее, чем больше образуется мартенсита в результате обработки холодом.

Температурный режим обработки холодом определяется положением нижней мартенситной точки. Более глубокое охлаждение не вызовет дополнительного превращения. Для облегчения обработки холодом часто погружают изделие в азот (температура кипения которого составляет -196 °С). Из-за низкой теплоты испарения азота металл охлаждается медленно.

При назначении режима термической обработки, включающей обработку холодом, необходимо учитывать явление стабилизации аустенита, так как в промышленных сортах стали, в структуре которых после закалки имеется остаточный аустенит, выдержка при комнатной температуре уменьшает количество остаточного аустенита, превращающегося при обработке холодом. Это и означает, что аустенит стабилизируется. Естественно, что при этом эффект обработки холодом уменьшается. Поэтому обработку холодом рекомендуется проводить немедленно после закалки [2]. В целом обработка холодом увеличивает микротвердость, износостойкость, абразивную стойкость и прочность режущего инструмента.

Инструментальным производством ПАО «ОДК-Кузнецов» были изготовлены опытные образцы протяжного инструмента из быстрорежущей порошковой стали Р18МП с применением технологии обработки холодом.

Быстрорежущая порошковая сталь P18МП склонна к карбидной неоднородности в связи с содержанием вольфрама, молибдена и ванадия. Наличие в структуре стали режущего инструмента грубых и неравномерно распределенных первичных карбидов является причиной выкрашивания рабочих поверхностей, что может приводить к внезапным поломкам, а также браку обрабатываемых изделий. Балл карбидной неоднородности проверяется на боковой и центральной поверхностях разрезанной заготовки протяжки посредством оценки продольных микрошлифов, подвергнутых предварительному травлению.

Термообработка позволяет получить более однородную структуру. Инструментальным производством ПАО «ОДК-Кузнецов» изготовлены образцы протяжного инструмента с дополнительной обработкой холодом при температуре $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

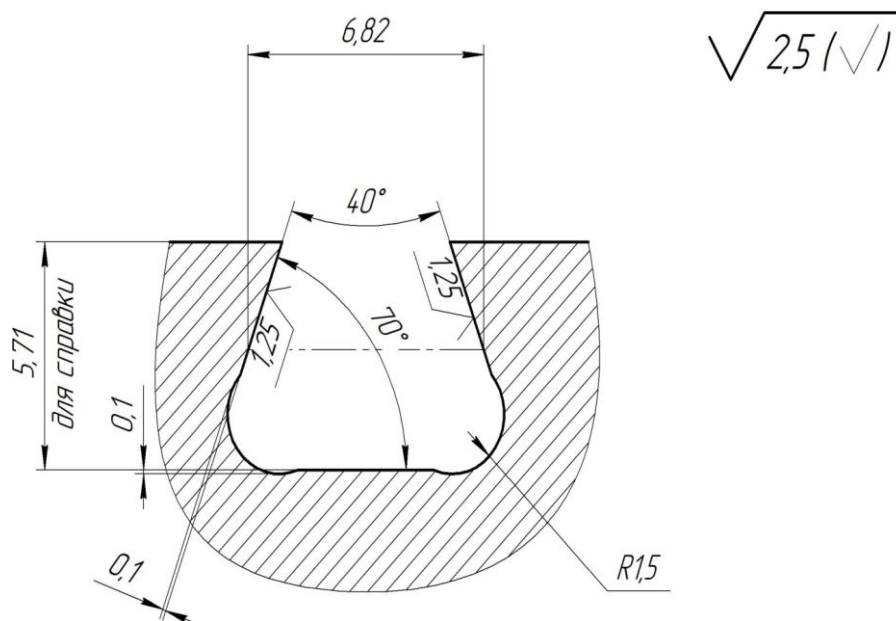


Рис. 1. Геометрические параметры пазов типа «ласточкин хвост»

Структура материалов представлена на рис. 2. Стоит отметить более равномерное распределение первичных карбидов в структуре материала изготовленных протяжек из стали P18МП с применением технологии обработки холодом.

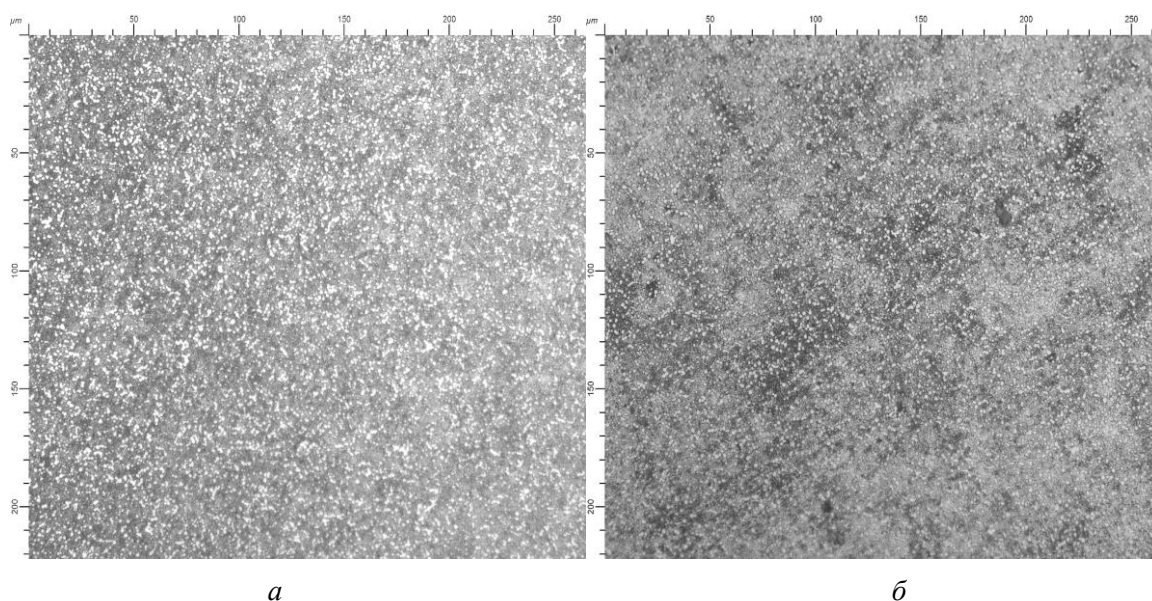


Рис. 2. Структура материала протяжек при увеличении $\times 500$:
 а – сталь P18МП до криогенной обработки; б – сталь P18МП после криогенной обработки

Организованы и проведены работы по протягиванию пазов в опытных дисках из сплава ВВ751П. Критерием определения стойкости и прекращения испытаний было отклонение геометрических параметров обрабатываемого паза за пределы допуска. Стойкость инструмента после замены материала протяжек и применения обработки холодом составила 20–25 пазов между переточками, что в 2–2,5 раза превышает ранее полученные показания. При этом полученная шероховатость на всех обработанных образцах была ниже, чем после обработки серийным инструментом, что говорит о повышении остроты режущей кромки и сопротивления износу.

Выполненные опытные работы демонстрируют эффективность применения технологии криогенной обработки быстрорежущих порошковых сталей отечественного производства для повышения стойкости рабочих поверхностей протяжного инструмента при работе с труднообрабатываемыми материалами, применяемыми в авиационной промышленности. Учитывая результаты проведенных работ, можно сделать вывод о необходимости последующих мероприятий по изысканию новых перспективных инструментальных материалов и более углубленному изучению процессов криогенной обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кацев, П.Г. Протяжные работы: учебное пособие для индивидуального и бригадного обучения рабочих на производстве / П.Г. Кацев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1968. – 247 с.
2. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ДВУХЭТАПНОЙ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМАГНИТНЫХ СПЛАВОВ

Куфаев В.Г., аспирант

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: kufaev1999@mail.ru*

В рамках данной работы были проведены эксперименты по исследованию влияния магнитно-абразивной обработки на качество заготовок, изготовленных из бронзы. В частности, контролировались шероховатость и твёрдость поверхностного слоя данных заготовок – параметры, крайне важные при функционировании деталей в эксплуатационных условиях. Контроль вышеозначенных параметров показал значительное улучшение шероховатости заготовок, а также рост их твёрдости. Полученные результаты позволяют продолжать дальнейшие исследования в данной области.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, шероховатость, твёрдость, вкладыши подшипников скольжения

ON THE POSSIBILITIES OF TWO-STAGE MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING IN IMPROVING THE QUALITY OF PARTS MADE OF NON-MAGNETIC ALLOYS

Kufaev V.G., PhD student

*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: kufaev1999@mail.ru*

In this work, experimental studies were conducted to study the effect of magnetic-abrasive machining on the quality of bronze workpieces. In particular, the roughness and microhardness of the surface layer of these workpieces were controlled – parameters that are extremely important for the functioning of parts under operating conditions. Monitoring the above parameters showed a significant improvement in the roughness of the workpieces, as well as an increase in their microhardness. The results obtained allow us to continue further research in this area.

Keywords: magnetic-abrasive finishing, roughness, microhardness, plain bearing shells

Целью исследований являлась необходимость подтверждения эффективности данного метода обработки в условиях его использования в слабомагнитной среде и установление его основных закономерностей. В современном горном машиностроении детали из немагнитных сплавов применяются в значительном количестве. К примеру, широко распространены подшипники скольжения, которые используют в карьерных самосвалах БЕЛАЗ, дробильных мельницах, гидравлических насосах. Рабочей частью данных узлов выступают вкладыши, которые часто изготавливают из бронзы ввиду её высоких антифрикционных свойств. В то же время вкладыши подвергаются значительным нагрузкам, что приводит к изнашиванию их рабочей поверхности, появлению на ней задиров и дорожек износа [1]. Следствием этого является остановка машин на обслуживание и ремонт, что подразумевает восстановление или замену повреждённых вкладышей. Ввиду всего вышесказанного в настоящее время актуальной является задача по повышению качества поверхностного слоя бронзовых вкладышей подшипников скольжения, в частности, параметров шероховатости и твёрдости, неудовлетворительные значения которых часто являются причиной потери данными деталями работоспособности.

Настоящее исследование имело своей целью показать потенциал метода магнитно-абразивной обработки в этой области. Работы отечественных учёных [2, 3] в данной сфере показывают, что магнитно-абразивная обработка оказывает значительное положительное влияние на качество обработанных заготовок, формируя поверхностный профиль, эффективно функционирующий в условиях контакта и трения.

Традиционно метод магнитно-абразивной обработки предполагает размещение заготовки в пространстве между полюсами, соединёнными с катушками индуктивности [5]. Формируемое таким образом в межполюсном пространстве магнитное поле используется для удержания порошка, который используется в качестве инструмента для обработки заготовок. Сила магнитного поля регулируется путём изменения силы тока, подаваемого на катушки. Значительное влияние на эффективность обработки оказывают значения частоты вращения и подачи заготовки. В настоящем исследовании основное внимание уделялось также значению зазора между заготовкой и полюсами, поскольку известно, что от него в наибольшей степени зависит этап обработки – будет она черновой или чистовой [4].

В качестве заготовок было использовано 4 прутка, изготовленных из бронзы БрАЖ-9-4. Работы проводились с использованием магнитной системы, установленной на станке с ЧПУ EMCO Concept Mill 250. Каждая заготовка была поделена на три зоны: правую, центральную и левую, что дало в сумме 12 зон для обработки. До обработки для каждой зоны заготовки были определены средние значения шероховатости и твёрдости с использованием, соответственно, профилометра Mitutoyo SJ-210 и твердомера НТИ НТ-1208 (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторные приспособления, использованные в экспериментальных исследованиях:
а – профилометр Mitutoyo SJ-210; б – твердомер НТИ НТ-1208

Стоит отметить, что кроме традиционно используемого параметра Ra шероховатость оценивалась также по параметрам глубины профиля (Rk), средней высоты выступов (Rpk) и средней глубины впадин (Rvk). Использование данных параметров было мотивировано тем, что они дают наилучшее представление о работе поверхностей в условиях полужидкого трения. Так, к примеру, параметр Rvk позволяет судить о маслоёмкости поверхности [5].

Экспериментальные исследования предполагали проведение 24 опытов: каждая зона заготовок обрабатывалась по два раза с определённым сочетанием времени обработки и значения зазора между заготовкой и полюсами. Первый этап (черновой) заключал в себе 12 опытов с временем обработки от 4 до 6 мин и значением зазора от 1 до 2,5 мм. Второй этап (чистовой) проводился со следующими значениями: время обработки от 1 до 3 мин и величина зазора от 3 до 4,5 мм.

После черного этапа обработки были повторно измерены значения средней шероховатости и твердости каждой зоны (табл. 1). Полученные значения сравнивались со значениями до обработки.

Таблица 1

Результаты измерения параметров шероховатости и твердости до экспериментов

| № заготовки | Контролируемые параметры | | | | |
|-------------|--------------------------|-----------------|------------------|------------------|---------------------------------|
| | <i>Ra</i> , мкм | <i>Rk</i> , мкм | <i>Rpk</i> , мкм | <i>Rvk</i> , мкм | <i>HB</i> , кгс/мм ² |
| 1 П | 1,636 | 3,720 | 0,698 | 3,844 | 192 |
| 1 Ц | 0,562 | 1,802 | 0,630 | 0,932 | 221 |
| 1 Л | 0,732 | 2,181 | 0,755 | 1,352 | 229 |
| 2 П | 1,649 | 3,945 | 1,736 | 3,619 | 194 |
| 2 Ц | 1,481 | 3,830 | 0,477 | 2,458 | 240 |
| 2 Л | 1,041 | 2,797 | 1,000 | 2,764 | 191 |
| 3 П | 3,156 | 10,645 | 3,494 | 2,406 | 238 |
| 3 Ц | 3,276 | 11,709 | 0,845 | 1,195 | 238 |
| 3 Л | 1,945 | 4,660 | 1,261 | 4,101 | 198 |
| 4 П | 1,877 | 3,890 | 1,184 | 4,570 | 229 |
| 4 Ц | 1,063 | 2,996 | 0,660 | 2,021 | 211 |
| 4 Л | 1,889 | 4,465 | 0,830 | 3,550 | 207 |

Так, наилучшие значения до обработки имела центральная зона первой заготовки, отдельно выделенная в таблице (участок 1 Ц). Наихудшие значения до обработки имела центральная зона третьей заготовки (участок 3 Ц). Амплитуда колебаний шероховатости по профилограмме также уменьшилась.

После чистового этапа исследований были проведены аналогичные замеры, сведённые в табл. 2. Также стоит отметить, что начальная твердость центральной зоны первой заготовки после двух этапов обработки выросла с 221 до 225, этот параметр для центральной зоны третьей заготовки – с 218 до 221.

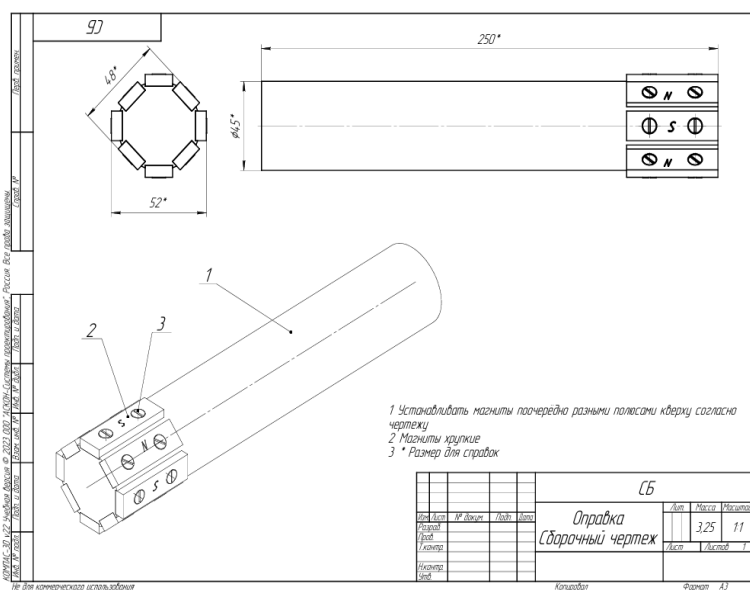
Таким образом, была проведена двухэтапная магнитно-абразивная обработка бронзовых заготовок. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности данного процесса: для двух описанных зон было отмечено более чем двукратное снижение шероховатости по параметру *Ra*. Для остальных же параметров в ряде случаев было отмечено четырёх- и пятикратное улучшение.

Результаты данного исследования были использованы для разработки конструкции устройства для магнитно-абразивной обработки бронзовых вкладышей подшипников скольжения. Поскольку вкладыш представляет собой втулку, в которой нужно обработать внутреннюю часть, использование описанной системы для магнитно-абразивной обработки не представляется возможным. Сведения, полученные из литературы по магнитно-абразивной обработке [6], позволяют утверждать, что в данном случае наиболее эффективным будет использование цилиндрической оправки с установленными по её окружности постоянными магнитами. При этом количество магнитов будет изменяться в зависимости от диаметра обрабатываемого вкладыша. На магниты будет наноситься абразивная масса, затем устройство будет вводиться в отверстие вкладыша и производить обработку. Данное устройство в значительной степени универсально, его можно применять как на токарном, так и на фрезерном станке, кроме того, оно не требует подачи тока и может использоваться без дополнительного оборудования.

Результаты измерения параметров шероховатости и твёрдости после экспериментов

| Обозначение участков заготовок | Контролируемые параметры | | | | | Режимные параметры | | |
|--------------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------|--------------------|--------------|-------------------------|
| | Ra , мкм | Rk , мкм | Rpk , мкм | Rvk , мкм | HB , кгс/мм ² | t , мин | S , мм/мин | n , мин ⁻¹ |
| 1 П | 1,114 | 2,211 | 0,447 | 2,910 | 204 | 6 | 75 | 350 |
| 1 Ц | 0,239 | 0,646 | 0,148 | 0,654 | 219 | 8 | 125 | 350 |
| 1 Л | 0,588 | 1,726 | 0,477 | 1,313 | 240 | 10 | 175 | 350 |
| 2 П | 0,870 | 1,907 | 0,594 | 2,222 | 196 | 12 | 225 | 350 |
| 2 Ц | 0,724 | 1,964 | 0,380 | 1,746 | 245 | 6 | 75 | 450 |
| 2 Л | 0,833 | 2,045 | 0,488 | 2,155 | 199 | 8 | 125 | 450 |
| 3 П | 1,962 | 4,314 | 0,379 | 4,164 | 248 | 10 | 175 | 450 |
| 3 Ц | 1,434 | 2,685 | 0,456 | 3,350 | 221 | 12 | 225 | 450 |
| 3 Л | 1,206 | 2,248 | 0,424 | 3,121 | 200 | 5 | 75 | 600 |
| 4 П | 1,065 | 2,579 | 0,444 | 2,463 | 236 | 8 | 125 | 600 |
| 4 Ц | 1,492 | 4,077 | 0,561 | 2,277 | 219 | 10 | 175 | 600 |
| 4 Л | 1,540 | 3,934 | 0,773 | 2,913 | 215 | 12 | 225 | 600 |

В настоящее время устройство изготовлено (рис. 2) и зарегистрирована заявка на патент. В ближайшее время устройство будет использовано при проведении исследований по обработке внутренних поверхностей бронзовых втулок.



а

б

Рис. 2. Магнитопроводящая оправка для обработки бронзовых вкладышей подшипников скольжения:

а – чертёж оправки в программной среде КОМПАС-3D; б – вид изготовленной оправки

Перед созданием конструкции устройства в программной среде ANSYS Maxwell было проведено моделирование распределения магнитной индукции в зазоре между обрабатываемой поверхностью заготовки и постоянными магнитами. Результаты показали соответствие закономерностям, полученным в данной работе. У магнитов, расположенных дальше

от поверхности заготовки, наблюдались невысокие значения магнитной индукции – они не превышали 1,2 Тл, что объясняется меньшей плотностью порошка и большими расстояниями между зёрнами. Напротив, магниты, ближе расположенные к поверхности заготовки, способствовали генерации более сильного магнитного поля – значения индукции превышали 2 Тл.


Изложенные выше данные показывают, что созданное устройство сочетает в себе условия для обеспечения как черновой, так и чистовой стадий обработки за один технологический переход. Это способствует созданию неравномерного профиля обработанной поверхности, который будет сочетать как выглаженные участки с малыми значениями шероховатости, так и участки более грубые, которые при эксплуатации вкладыша подшипника скольжения будут служить зонами для удержания смазки в зоне трения.

Таким образом, проведённые экспериментальные исследования доказали эффективность магнитно-абразивной обработки в области повышения качества заготовок, изготовленных из немагнитных сплавов, что видно по снижению шероховатости и незначительному увеличению твёрдости поверхностей заготовок. В свою очередь, это позволило перейти к следующему этапу исследований и использовать полученные закономерности для создания конструкции устройства, которое будет в дальнейшем использовано для обработки заготовок, наиболее приближённых по размерам, форме и свойствам к вкладышам подшипников скольжения. Моделирование распределения магнитного поля также подтвердило закономерности, полученные для системы с полюсами и катушками индуктивности – различная индукция в рабочих зазорах способствует получению поверхностей с различными свойствами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Солнцев, Ю.П. Специальные материалы в машиностроении: учебник / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пириайнен. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2022. – 664 с.
2. Maksarov, V.V. Influence of magnetic-abrasive processing on roughness of flat products made of AMts grade aluminum alloy / V.V. Maksarov, A.I. Keksin, I.A. Filipenko // *Tsvetnye Metally*. – 2022. – No. 7. – Pp. 82–87. – DOI: 10.17580/tsm.2022.07.09.
3. Ahmad, S. Development of Al_2O_3 - SiO_2 based magnetic abrasive by sintering method and its performance on ti-6Al-4V during magnetic abrasive finishing / S. Ahmad, R.M. Singari, R.S. Mishra // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. – 2021. – No. 99 (2). – Pp. 94–101. – DOI: 10.1080/00202967.2021.1865644.
4. Batmani, S. Effect of magnetic abrasive finishing on the corrosion behavior by agricultural pesticides corrosive media / S. Batmani, R. Yeganeh, & A. Azizi // *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. – 2021. – No. 7 (2). – DOI: 10.1007/s40735-021-00477-9.
5. Maksarov, V.V. Features of the distribution of magnetic induction during magnetic-abrasive processing of synchronizers made of structural alloy steel / V.V. Maksarov, D.A. Klochkov // *Chernye Metally*. – 2023. – No. 7. – Pp. 78–85. – DOI: 10.17580/chm.2023.07.10.
6. Максаров, В.В. Выбор параметров процесса магнитно-абразивного полирования для обработки кромок корпусных деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов / В.В. Максаров, М.В. Ефимова, И.А. Филипенко // *Цветные металлы*. – 2024. – № 3. – С. 78–84. – DOI: 10.17580/tsm.2024.03.11.
7. Гимадеев, М.Р. Оценка влияния параметров шероховатости на эксплуатационные характеристики гладких цилиндрических отверстий и оптимизация алгоритмов механической обработки / М.Р. Гимадеев // *Ученые заметки ТОГУ*. – 2015. – Т. 6, № 4. – С. 429–435.
8. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 176 с.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ПРЕДЕЛОМ ВЫНОСЛИВОСТИ


Морозов А.Ю., аспирант, **Павлов В.Ф.** , д.т.н., профессор,
Прохоров А.А., к.т.н., доцент, **Денискина Е.А.**, к.т.н., доцент

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

Данное исследование подтвердило значительное влияние остаточных напряжений на предел выносливости деталей при различных типах деформации. Сжимающие остаточные напряжения способствуют увеличению предела выносливости, особенно в условиях изгиба и растяжения-сжатия. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов упрочнения и прогнозирования долговечности деталей машин. Существенное влияние на предел выносливости оказывает гидродробеструйная обработка, обеспечивающая создание стабильных сжимающих остаточных напряжений на больших глубинах.

Ключевые слова: остаточные напряжения, предел выносливости, концентрация напряжений, усталостная прочность

THE RELATIONSHIP OF OPERATIONAL FACTORS WITH RESIDUAL STRESSES AND ENDURANCE LIMITS

Morozov A.Yu., PhD student, **Pavlov V.F.** , Grand PhD in Engineering Sciences, Professor,
Prokhorov A.A., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Deniskina E.A., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
Samara, Russian Federation
E-mail: pavlov.vf@ssau.ru*

The study confirmed the significant influence of residual stresses on the fatigue limit of components under various types of deformation. Compressive residual stresses contribute to an increase in the fatigue limit, especially under bending and tension-compression conditions. The obtained results can be utilized to optimise strengthening processes and predict the durability of machine components. Hydroblasting has a significant effect, ensuring the creation of stable compressive residual stresses at great depths.

Keywords: residual stresses, endurance limit, stress concentration, fatigue strength

Настоящая работа направлена на изучение воздействия различных видов деформации, таких как изгиб, кручение и растяжение-сжатие, на характер распределения остаточных напряжений, и показатели усталостной прочности упрочнённых деталей и образцов. В рамках исследования были проанализированы ключевые закономерности, связанные с изменением остаточных напряжений под влиянием деформационных процессов. Приведены результаты экспериментальных испытаний, на основе которых сформулированы выводы о воздействии различных факторов на механические характеристики материалов.

Для проведения исследований были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 12 мм, выполненные из сталей 30ХГСА, ЭИ961, 40, а также из алюминиевого сплава В95. Механические свойства данных материалов приведены в табл. 1. Часть образцов прошла гидродробеструйную обработку (ГДО) в соответствии с режимами, указанными в табл. 2. Образцы из стали 30ХГСА были упрочнены с использованием двух различных режимов обработки.

Для определения остаточных напряжений использовался метод снятия части поверхностного слоя образцов [1]. Испытания проводились на усталостных машинах при симметричном цикле.

Таблица 1

Механические характеристики материалов

| Материал | Механические характеристики | | | | |
|----------|-----------------------------|----------------------|--------------|------------|-------------|
| | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % | S_k , МПа |
| 30ХГСА | 796 | 534 | 17,4 | 67,3 | 1520 |
| ЭИ961 | 913 | 769 | 16,9 | 65,1 | 1720 |
| сталь 40 | 580 | 322 | 30,8 | 52,1 | 988 |
| В95 | 649 | 593 | 8,8 | 16,4 | 792 |

Таблица 2

Режимы гидродробеструйной обработки

| Материал | Давление масла p , МПа | Время обработки τ , мин | Диаметр шариков $d_{ш}$, мм |
|----------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 30ХГСА | 0,19 | 8 | 2 |
| 30ХГСА | 0,30 | 8 | 2 |
| ЭИ961 | 0,29 | 8 | 2 |
| сталь 40 | 0,25 | 8 | 2 |
| В95 | 0,19 | 8 | 2 |

На образцы из сталей ЭИ961, 40 и сплава В95, не подвергавшиеся упрочнению, и упрочнённые, наносились полукруглые надрезы глубиной $\rho_0 = 0,3$ мм [2-4]. На образцы, изготовленные из стали 30ХГСА, были нанесены надрезы с глубиной $\rho_0 = 0,35$ мм и $\rho_0 = 0,5$ мм. Кроме того, в рамках исследования изучались образцы из стали 40, на которых были выполнены одиночные и групповые надрезы прямоугольного профиля. Размеры данных надрезов представлены на рис. 1 и 2 ($t = b = 0,5$ мм, $\rho_0 = 0,1$ мм, $P = 3$ мм, $D_I = 12$ мм).

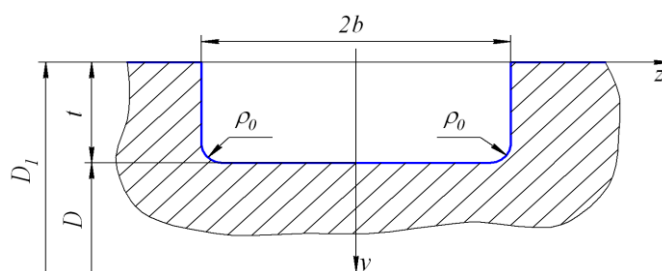


Рис. 1. Надрез прямоугольной формы, выполненный в одиночном варианте

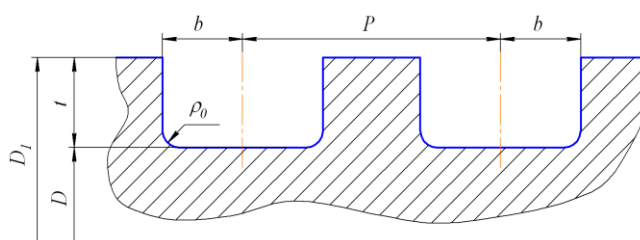


Рис. 2. Надрезы прямоугольной формы, выполненные в групповом варианте

Для всех образцов, за исключением образцов из стали 30ХГСА с глубиной надреза $\rho_0 = 0,5$ мм, распределение осевых остаточных напряжений σ_z для гладких образцов и образцов с полукруглыми надрезами показано на рис. 3 и 4.

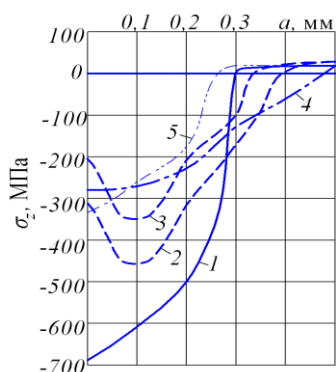


Рис 3. Остаточные напряжения в гладких образцах после ГДО:
1 – ЭИ961; 2 – 30ХГСА ($p = 0,30$ МПа);
3 – 30ХГСА ($p = 0,19$ МПа); 4 – В95;
5 – сталь 40

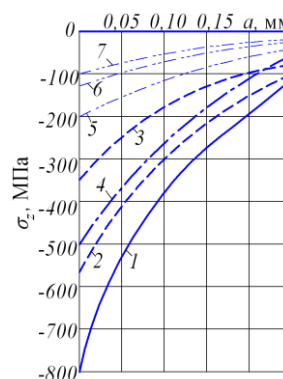


Рис 4. Остаточные напряжения в образцах с надрезом после ГДО:
1 – ЭИ961; 2 – 30ХГСА ($p = 0,30$ МПа);
3 – 30ХГСА ($p = 0,19$ МПа); 4 – В95;
5 – сталь 40; 6 – сталь 40, групповой надрез;
7 – сталь 40, одиночный надрез

Анализ данных, представленных на рис. 3, показывает, что материал в области дна надрезов у образцов из сталей ЭИ961, 30ХГСА ($\rho_0 = 0,5$ мм) и стали 40 находился в состоянии без наклёпа. В то же время у образцов из стали 30ХГСА ($\rho_0 = 0,35$ мм) и сплава В95 наблюдался наклёп. На рис. 4 изображены графики распределения осевых остаточных напряжений σ_z в поперечном сечении образцов с прямоугольными надрезами в зоне радиусного перехода, где была зафиксирована нераспространяющаяся усталостная трещина.

Результаты определения предела выносливости при кручении, обозначаемого как τ_{-1} приведены в табл. 3. Необходимо отметить, что в случае кручения нераспространяющиеся усталостные трещины проявляются менее отчётливо по сравнению с изгибом. Такие трещины характеризуются прерывистой структурой, а их размеры значительно варьируются относительно средней глубины при анализе контура излома. Тем не менее средняя глубина $t_{кр}$ соответствует определённой зависимости [4].

На основании полученных данных видно, что коэффициент влияния упрочнения $\bar{\psi}_\tau$ демонстрирует незначительные колебания и в среднем составляет 0,181, что в два раза ниже аналогичного показателя, наблюдаемого при изгибе [4]. Подобно изгибу коэффициент $\bar{\psi}_\tau$, рассчитанный по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [2, 4], не демонстрирует зависимости от степени неравномерного наклёпа на дне концентратора. Даже при изменении остаточных напряжений на поверхности надреза образцов из стали 30ХГСА в диапазоне от -222 МПа до -584 МПа значение коэффициента $\bar{\psi}_\tau$ остаётся постоянным. Следовательно, выводы относительно влияния сжимающих остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе справедливы и для случая кручения, с той лишь оговоркой, что коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ в два раза меньше, чем коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$.

Для опытов по определению влияния остаточных напряжений на предел выносливости при растяжении-сжатии в случае симметричного цикла напряжений использовались образцы, имеющие диаметр 10 мм, их материал и характеристики представлены в табл. 4. Половина образцов прошла гидродробеструйную обработку после их изготовления (режим указан в табл. 5).

Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

| Материал | Размеры образцов и концентраторов | | | | Неупрочнённые образцы | Упрочнённые образцы | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-------------------|---------------|-----------------------|---------------------|-------------------|---------------|----------------------------|
| | D_1 , мм | D , мм | тип надреза | ρ_0 , мм | | τ_{-1} , МПа | τ_{-1} , МПа | $t_{кр}$, мм | $\bar{\sigma}_{ост}$, МПа |
| 30ХГСА | 12 | 11,3 | полукр. | 0,35 | 180,7 | 207,1 | 0,240 | -146 | 0,181 |
| | | | | | | 222,5 | 0,235 | -233 | 0,179 |
| | 12 | 11,0 | полукр. | 0,50 | 185,3 | 201,1 | 0,235 | -92 | 0,172 |
| | | | | | | 211,4 | 0,230 | -149 | 0,175 |
| ЭИ961 | 12 | 11,4 | полукр. | 0,30 | 244 | 300 | 0,240 | -293 | 0,191 |
| В95 | 12 | 11,4 | полукр. | 0,30 | 37,5 | 72,5 | 0,250 | -193 | 0,180 |
| сталь 40 | 12 | 11,4 | полукр. | 0,30 | 150 | 166 | 0,250 | -94 | 0,170 |
| | 12 | 11,0 | прямоуг. одиноч. | 0,10 | 150,8 | 157,8 | 0,245 | -38 | 0,187 |
| | 12 | 11,0 | прямоуг. группов. | 0,10 | 150,4 | 160 | 0,230 | -49 | 0,195 |

Таблица 4

Механические характеристики исследуемых материалов

| Материал | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % | S_k , МПа |
|----------|------------------|----------------------|--------------|------------|-------------|
| сталь 45 | 610 | 396 | 24,2 | 51,8 | 1010 |
| 30ХГСА | 788 | 536 | 18,9 | 65,9 | 1484 |
| ЭИ961 | 1090 | 990 | 11,3 | 67,4 | 2050 |
| Д16Т | 547 | 426 | 14,8 | 16,5 | 647 |

Таблица 5

Режим гидродробеструйной обработки

| Материал | Давление масла (воздуха) P , МПа | Диаметр шариков d , мм | Время обработки τ , мин | Усилие накатывания R (выглаживания), кН | Число оборотов образца n , об/мин | Подача S , мм/об | Диаметр ролика D , мм | Профильный радиус ролика $R_{пр}$, мм |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------|-------------------------|--|
| ЭИ961, 30ХГСА, сталь 45 | 0,28 | 2 | 8 | – | – | – | – | – |

На образцы, как неупрочнённые, так и упрочнённые, с помощью безнаклёпного метода наносились надрезы полукруглой формы с радиусом $\rho_0 = 0,3$ мм. Эпюры распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a для гладких и надрезанных образцов приведены на рис. 5.

По представленным в табл. 6 результатам видно, что оценка воздействия поверхностного упрочнения на предел выносливости при растяжении-сжатии σ_{-1p} в условиях симметричного цикла с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений [2, 4] для образцов с одинаковой степенью концентрации напряжений даёт результаты, полученные в ходе исследования, и демонстрируют схожесть с данными, зафиксированными при изгибе.

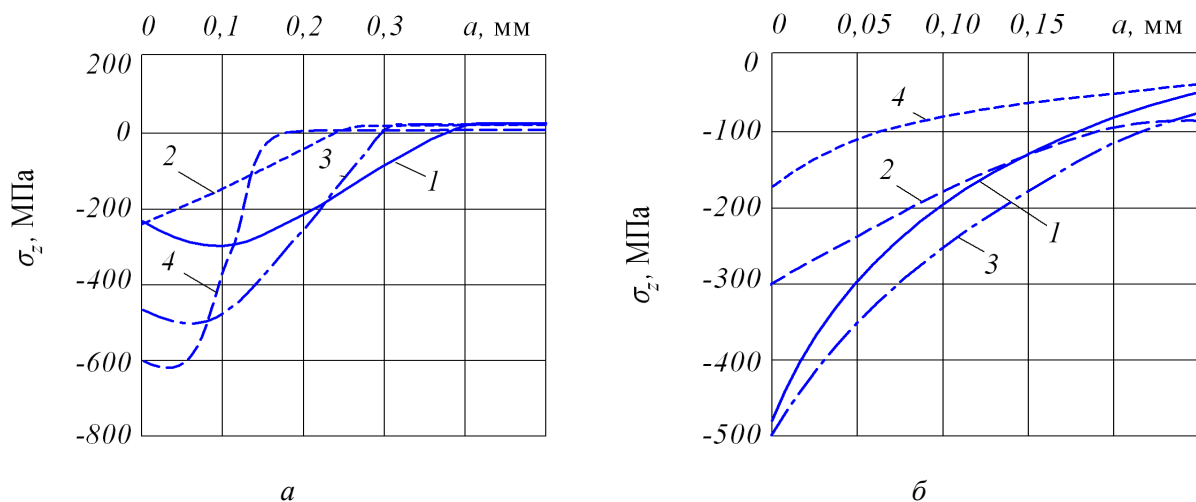


Рис. 5. Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом $\rho_0 = 0,3$ мм (б) после ГДО:

1 – сталь 45; 2 – 30ХГСА; 3 – ЭИ961; 4 – Д16Т

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma = 0,355$ практически совпадает с аналогичным показателем, определённым для изгиба. Кроме того, важно отметить, что критическая глубина нераспространяющейся усталостной трещины практически не отличается от значения $t_{кр}$, наблюдаемого при изгибе, для образцов с сопоставимыми поперечными размерами [4].

Таблица 6

Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

| Материал | Неупрочн. образцы σ_{-1p} , МПа | Упрочнённые образцы | | | |
|----------|---|-------------------------|------------------|-------------------------------|---------------------|
| | | σ_{-1p} , МПа | $t_{кр}$, мм | $\bar{\sigma}_{ост}$, МПа | $\bar{\psi}_\sigma$ |
| сталь 45 | 152,5 | 200 | 0,206 | -134 | 0,355 |
| 30ХГСА | 146 | 198 | 0,200 | -144 | 0,361 |
| ЭИ961 | 151,3 | 233,4 | 0,198 | -258 | 0,357 |
| Д16Т | 78,4 | 105 | 0,200 | -75,3 | 0,353 |

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности / Иванов С.И., Григорьева И.В. // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 48. – С. 179–183.
2. Павлов, В.Ф. Влияние величины сжимающих остаточных напряжений на приращение предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 7. – С. 10–14.
3. Радченко, В.П. Влияние пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на остаточные напряжения и предел выносливости образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т / В.П. Радченко, В.А. Кирпичёв, В.В. Лунин // Вестник СамГТУ. Серия «Физико-математические науки». – 2011. – № 3 (24). – С. 181–184.
4. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство «СНЦ РАН», 2012. – 125 с.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ: ТЕХНОЛОГИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ

Синюков М.С., аспирант

*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: sms-0305@yandex.ru*

Рассмотрена технология магнитно-абразивной обработки с использованием постоянных магнитов, актуальная для повышения качества обработки поверхностей в различных отраслях. Описаны особенности применения постоянных магнитов и природа действия магнитного поля, обеспечивающего управление абразивными частицами. Подробно изложена технология процесса и ее преимущества, включая экономичность и экологичность. Приведены примеры применения в авиастроении, медицине и электронике, где требуются высокая точность и качество обработки.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, постоянные магниты, магнитное поле, обработка поверхностей, точность, качество, промышленность, абразивные частицы, технология машиностроения

FEATURES OF MAGNETIC-ABRASIVE TREATMENT USING PERMANENT MAGNETS: TECHNOLOGY AND APPLICATION

Sinyukov M.S., PhD student

*St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: sms-0305@yandex.ru*

The technology of magnetic abrasive treatment using permanent magnets, which is relevant for improving the quality of surface treatment in various industries, is considered. The features of the use of permanent magnets and the nature of the action of the magnetic field providing control of abrasive particles are described. The process technology and its advantages, including cost-effectiveness and environmental friendliness, are described in detail. Examples of applications in the aircraft industry, medicine and electronics, where high precision and processing quality are required, are given.

Keywords: magnetic abrasive processing, permanent magnets, magnetic field, surface treatment, precision, quality, industry, abrasive particles, mechanical engineering technology

Магнитно-абразивная обработка (МАО) с использованием постоянных магнитов представляет собой инновационную технологию, которая может найти свое применение в различных отраслях промышленности. Данная методика позволяет значительно улучшить качество обработки поверхностей, обеспечивая высокую точность и эффективность [1, 2].

Современные производственные процессы требуют высокой точности и качества обработки материалов. Традиционные методы обработки не всегда способны удовлетворить эти требования, особенно когда речь идет о сложных формах и материалах с особыми свойствами. Применение магнитно-абразивной обработки при помощи устройств с постоянными магнитами позволяет решить указанные проблемы, обеспечивая высокую точность и однородность обработки, что делает ее актуальной для применения в таких отраслях, как авиастроение, автомобилестроение, медицинская техника и электроника.

Магниты (постоянные и переменные) играют ключевую роль в процессе магнитно-абразивной обработки. Они создают стабильное магнитное поле, которое используется для управления абразивными частицами, что позволяет точно контролировать процесс обработки с целью обеспечения равномерного снятия материала с поверхности. В отличие

от электромагнитов, постоянные магниты не требуют энергозатрат для поддержания магнитного поля, что делает процесс более экономичным и экологически чистым [3]. Устройства, работающие на основе постоянных магнитов, более мобильны и имеют широкое применение, например, могут быть использованы на станках различных групп и размеров.

Вводят основную характеристику, которая описывает силу магнитного поля, вектор магнитной индукции, обозначаемый как B . Этот вектор указывает направление и величину магнитного поля в каждой точке пространства.

Постоянные магниты создают магнитное поле благодаря внутренней структуре материала, где магнитные моменты атомов выстроены в одном направлении. Электромагниты создают поле за счет электрического тока, протекающего через проводник.

Магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами, воздействует на абразивные частицы, которые содержат ферромагнитные компоненты. Под действием магнитного поля частицы выстраиваются в определенные структуры, которые эффективно взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью. Метод магнитно-абразивной обработки поверхности позволяет не только удалять излишки материала, но и улучшать микроструктуру поверхности, снижая шероховатость и повышая износостойкость поверхности.

Понимание природы магнитного поля и его взаимодействия с материалами является ключевым для эффективного применения магнитно-абразивной обработки в промышленности.

Процесс магнитно-абразивной обработки включает несколько этапов. Сначала обрабатываемая деталь помещается в рабочую зону, где создается магнитное поле с помощью постоянных магнитов. Затем в зону обработки вводятся абразивные частицы, которые под действием магнитного поля начинают активно взаимодействовать с поверхностью детали. В зависимости от требуемого результата параметры магнитного поля и состав абразивных частиц могут варьироваться, что позволяет адаптировать процесс к конкретным задачам [4].

Постоянные магниты имеют фиксированную силу, но регулировать интенсивность их воздействия можно, изменяя расстояние между магнитами и обрабатываемой деталью. Вращения или продольные движения детали и инструмента, время обработки t , концентрация абразивных частиц q могут влиять на эффективность обработки и качество поверхности. Параметры, которые обычно нельзя менять, включают тип используемых постоянных магнитов, их материал и конструкцию.

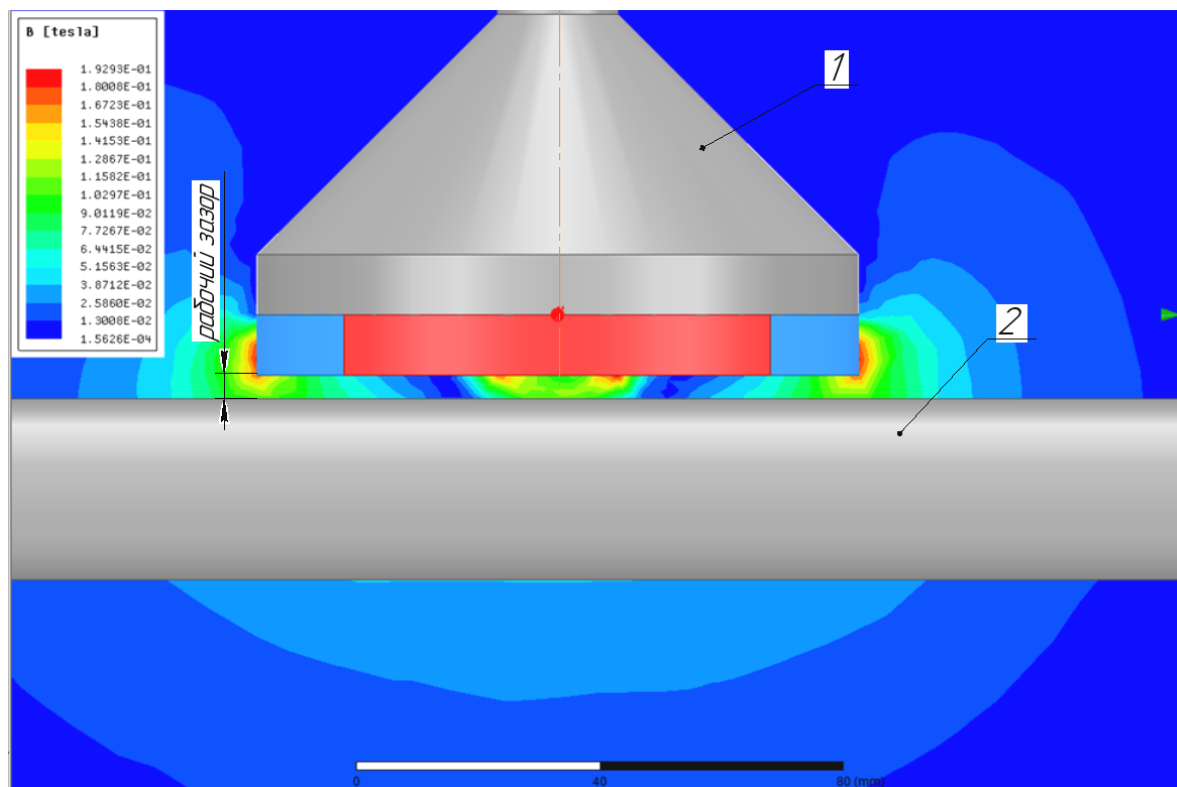
Перед изготовлением устройства следует проводить предварительное моделирование распределения магнитного поля в рабочем зазоре, чтобы определить, удовлетворяет ли предлагаемая конструкция требованиям по минимальным и максимальным значениям магнитной индукции B в рабочем зазоре (см. рисунок).

Рассмотрено применение магнитно-абразивной обработки с целью обеспечения качества паяного соединения плоскоооальной трубы и оребрения теплообменных аппаратов. Магнитно-абразивная обработка позволяет уменьшить толщину оксидной пленки, снизить шероховатость поверхности и очистить её от загрязнений, что активизирует поверхность перед пайкой.

Была проведена магнитно-абразивная обработка плоскоооальной трубы из алюминия с помощью устройства с постоянными магнитами. Предварительно на рабочие поверхности магнитов помещали магнитно-абразивный порошок, устройство определяли относительно обрабатываемой поверхности с учетом величины рабочего зазора δ и придавали вращение устройству с частотой n относительно оси симметрии. Основные режимные параметры обработки составляли: магнитная индукция $B = 0,9$ Тл, частота вращения $n = 450$ мин⁻¹; величина рабочего зазора $\delta = 2$ мм; время обработки $t = 6$ мин.

В результате магнитно-абразивной обработки удалось достичь снижения значений шероховатости обрабатываемой плоской поверхности с 1,8 мкм по R_a до 0,6 мкм по R_a .

В авиастроении и автомобилестроении МАО может быть использована для обработки сложных деталей, требующих высокой точности и качества поверхности – литых лопаток турбин, дисков колес [5]. В медицине технология может найти применение для обработки инструментов и имплантов, где важна высокая степень чистоты и гладкости поверхности [6].



Моделирование распределения магнитного поля в рабочем зазоре:
1 – устройство; 2 – заготовка

В заключение следует отметить, что магнитно-абразивная обработка с использованием постоянных магнитов представляет собой перспективную технологию, которая открывает новые возможности для повышения качества и эффективности производственных процессов. Ее применение позволяет решать сложные задачи обработки, обеспечивая высокую точность и надежность результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ahmad, S. Development of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ based magnetic abrasive by sintering method and its performance on Ti-6Al-4V during magnetic abrasive finishing / S. Ahmad, R.M. Singari, R.S. Mishra // Transactions of the IMF. 2021. – Vol. 99 (2). – Pp. 94–101. – DOI: 10.1080/00202967.2021.1865644.
2. Акулович, Л.М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.Я. Лебедев. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.
3. The use of composite powders in the process of magnetic abrasive treatment of taps to improve the quality of threads in corrosion-resistant steel products / V.V. Maksarov, Olt Yu, A.I. Kexsin, R.A. Shcheglova // Ferrous Metals. – 2022. – No. 2. – Pp. 49–55. – DOI:10.17580/chm.2022.02.09.
4. Maksarov, V.V. Influence of magnetic-abrasive machining parameters on ceramic cutting tools for technological quality assurance of precision products from cold-resistant steels / V.V. Maksarov, M.A. Popov, V.P. Zakharova // Chernye Metally. – 2023. – Vol. 1. – Pp. 67–73. – DOI: 10.17580/chm.2023.01.10.
5. Барон, Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1975. – 128 с.
6. Removal mechanism of magnetic abrasive finishing on aluminum and magnesium alloys / P. Zhu, G. Zhang, J. Du, L. Jiang, P. Zhang, Y. Cui // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 114 (5–6). – Pp. 1717–1729. – DOI: 10.1007/s00170-021-06952-4.

ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ

Филипович О.В.✉, доцент, к.т.н., доцент

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация
E-mail: ophisl@yandex.ru

Рассмотрены варианты постановки оптимизационных задач применительно к процессам однопараметрической селективной сборки, определены целевые функции и наборы варьируемых переменных, от которых они зависят. На базе разработанных математических моделей при заданных ограничениях получены решения ряда задач оптимизации селективной сборки, позволяющие повысить показатели технологического процесса.

Ключевые слова: селективная сборка, показатели, математическая модель, оптимизация

PROBLEMS OF OPTIMISING THE INDICATORS OF SINGLE-PARAMETER SELECTIVE ASSEMBLY

Filipovich O.V.✉, Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: ophisl@yandex.ru

The variants of optimisation problems formulation in relation to single-parameter selective assembly processes are considered, target functions and sets of variable variables on which they depend are determined. On the basis of the developed mathematical models, solutions of a number of selective assembly optimisation problems have been obtained under the given constraints, allowing to improve the technological process indicators.

Keywords: selective assembly, indicators, mathematical model, optimisation

Построению математических моделей с целью анализа процессов однопараметрической селективной сборки посвящено большое количество работ отечественных [1, 2] и зарубежных исследователей [3–5]. Для повышения эффективности функционирования сборочных систем математический аппарат может использоваться в качестве базы для решения ряда задач оптимизации показателей селективной сборки. Такие задачи можно разделить на два типа: условные и безусловные [6–9]. Безусловная оптимизация состоит в нахождении экстремума целевой функции при отсутствии каких-либо ограничений. Такие задачи в отношении сборочных процессов встречаются достаточно редко, хотя, теоретически, и имеют место. На практике представляется необходимым решать задачи условной оптимизации при заданных ресурсных ограничениях, формирующих область допустимых решений.

Для формализации экстремальных задач необходимо определить критерии (целевые функции) и управляемые переменные. В качестве критериев оптимальности могут выступать:

- вероятность образования сборочных комплектов (СК) всех типов, $I_{СК}$;
- вероятность образования элементов, не вошедших ни в один из СК, I_B ;
- доля годных СК в общем числе СК, полученных в силу принятых правил комплектования (собираемость), P_1 ;
- доля исходного числа элементов, образующих годные СК (выход годных), P_0 ;
- стоимостные функционалы.

Вероятность P_0 из перечисленных выше критериев является комплексной характеристикой сборочного процесса, определяемой системой показателей качества. Первые четыре показателя, перечисленные выше, можно найти, используя подходы и методы, приведенные в [10–12] при наличии имеющегося априори набора данных. Однако, как отмечено в [2], влияние разнородных и труднодоступных факторов можно оценить при переходе к некоторой единой унифицированной системе измерений, которой является стоимость. Именно стоимостная постановка задачи определяет в конечном итоге эффективность технологического процесса в экономическом выражении, однако здесь существуют трудности, связанные с вычислением экономического вклада различных факторов.

Каждый из перечисленных критериев имеет довольно схожий набор варьируемых переменных. К ним можно отнести:

- 1) вид и параметры законов распределения случайных величин, с которыми оперируют стохастические модели;
- 2) величины расширенных допусков на изготовление параметров;
- 3) величины групповых допусков, количество и границы селективных групп каждого элемента;
- 4) правила комплектования;
- 5) величины партий элементов различных типов.

Первые два набора связаны с точностными характеристиками основного технологического оборудования процессов изготовления элементов, а также с метрологическим обеспечением сборочных этапов. Третий набор в совокупности с четвертым определяет суть селективной сборки и влияет на достижение показателей качества и сложность процесса. Пятый определяет объем выпуска готовых изделий. Дополнительно сюда можно отнести количество контролируемых параметров (в подавляющей большинстве случаев является заданным) и количество компонент вектора возмущений, обуславливающих сложность математической модели и затраты на вычислительные ресурсы, требуемые для ее реализации.

При решении подобных экстремальных задач необходимо разрешить целый ряд проблем, связанных с разработкой алгоритмов и программ. Сложности заключаются в том, что приведенные критерии являются функциями множества переменных, т. е. речь идет о многомерной оптимизации. Кроме этого, во всех случаях задачи относятся к классу нелинейных задач математического программирования. Аналитически их решить или достаточно просто, или вовсе невозможно, поэтому прибегают к известным или специально разработанным численным методам.

На базе предложенных критериев решены следующие задачи.

1. Задача оптимизации процесса сборки прецизионного соединения двух однопараметрических деталей питателя (пары «плунжер – корпус») селективным методом [13]. Для увеличения собираемости использован прием, связанный с целенаправленным изменением настроек технологического оборудования на этапе изготовления: объемы партий Q_i разбиваются на определенное количество n_i неравных частей с вероятностью попадания в j -ю часть, равной $\frac{q_{ij}}{Q_i}$ ($j = \overline{1, n_i}$). Каждая часть изготавливается независимо от остальных при заданном смещении центра настройки c_{ij} основного технологического оборудования либо относительно координат середин интервалов допусков Esc_i , либо относительно математических ожиданий случайных величин (СВ) x_i – параметров собираемых деталей. Плотности распределений параметров каждой из частей имеют вид

$$\frac{q_{ij}}{Q_i} f_{i1}(x_i - c_{ij}), \quad j = \overline{1, n_i}, \quad i = \overline{1, 2},$$

где $f_{i1}(x_i)$ – плотности распределения СВ x_i ($i = \overline{1, 2}$).

Сама задача состояла в нахождении значений управляемых переменных для обеспечения максимума целевой функции

$$I_{CK} = I_{CK}(a_i^{(k_i)}, n_i, q_{ij}, c_{ij}), \quad j = \overline{1, n_i}, \quad i = \overline{1, 2},$$

при ограничениях:

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, \quad c_{ij\min} \leq c_{ij} \leq c_{ij\max}; \quad [c]_{ij} \geq [c]_{ij\min}, \quad q_{ij} \geq q_{ij\min}, \quad \frac{1}{Q_i} \sum_{j=1}^{j=n_i} q_{ij} = 1,$$

где y – выходной параметр собираемого изделия;

$a_i^{(k_i)}$ определяют границы интервалов групповых допусков k_i -х селективных групп ($k_i = \overline{1, l_i}$).

При решении задачи максимизации управляемые переменные одной из деталей (корпус) были зафиксированы, а другой (плунжер) – варьировались. Данная задача была решена в трех вариантах:

1) без разбиения партий на части при варьировании групповых допусков одной из деталей (плунжер);

2) с разбиением партии одной из деталей (плунжер) на части при номинальных значениях групповых допусков;

3) комбинация вариантов 1 и 2.

Были рассмотрены три случая.

Случай 1. СВ имеют смещения математических ожиданий относительно координат середин интервалов допусков и различные дисперсии.

Случай 2. Математические ожидания СВ совпадают с координатами середин интервалов допусков при различных дисперсиях.

Случай 3. Математические ожидания СВ имеют смещения относительно координат середин интервалов допусков, дисперсии одинаковы.

2. Задача многовариантного комплектования деталей роликового игольчатого подшипника качения, образующих радиальный зазор, путем рационального выбора весов комплектования [14].

Для многовариантного правила комплектования подшипника, определяемого известным уравнением комплектования, записанным в номерах селективных групп, в рассмотрение вводились множества весов

$$\Lambda = \{ \lambda_{ik_i}^{(k)}, k_i = \overline{1, l_i}, i = \overline{1, 2}, k = \overline{1, L} \},$$

где $\lambda_{ik_i}^{(k)}$ определяет часть элементов i -го типа k_i -й селективной группы, включаемую в сборочный комплект k -го типа.

При решении задачи оптимизации определялись $\lambda_{ik_i}^{(k)} \in \Lambda$, доставляющие максимум функции

$$I_{CK} = I_{CK}(\lambda_{ik_i}^{(k)})$$

при ограничениях

$$\sum_{k=1}^L \lambda_{ik_i}^{(k)} \leq 1.$$

3. Задача оптимального комплектования узла шатунно-поршневой группы, содержащего три детали (1 – палец, 2 – поршень, 3 – втулка шатуна) [15]

$$I_{CK} = f(a_i^{(k_i)}) \rightarrow \max,$$

при заданных значениях расширенных допусков и расположении интервалов допусков путем рационального выбора границ селективных групп при ограничениях

$$S_{\min 3-1}^{(k_i)} \geq S_{\min 3-1}, S_{\max 3-1}^{(k_i)} \leq S_{\max 3-1}, S_{\min 2-1}^{(k_i)} \geq S_{\min 2-1}, S_{\max 2-1}^{(k_i)} \leq S_{\max 2-1},$$

где S_{\min} , S_{\max} – предельные зазоры в соединении деталей 1, 2, 3;

$S_{\min}^{(k_i)}$, $S_{\max}^{(k_i)}$ – зазоры, образуемые деталями, собираемыми по одновариантному правилу комплектования из k_i -х селективных групп.

Полученные оптимальные решения позволяют повысить показатели качества селективной сборки на 5–15 % и могут применяться при синтезе и параметрической оптимизации сборочных процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бонч-Осмоловский, М.А. Селективная сборка / М.А. Бонч-Осмоловский. – М.: Машиностроение, 1974. – 144 с.
2. Катковник, В.Я. Основы теории селективной сборки / В.Я. Катковник, А.И. Савченко. – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
3. Mansoor, E.M. Selective assembly: its analysis and applications / E.M. Mansoor // *Int. J. Prod. Res.*, 1961. – Vol. 1 (1). – Pp. 13–24.
4. Pugh, G.A. Partitioning for selective assembly / G.A. Pugh // *Comput. Ind. Eng.*, 1986. – Vol. 11 (1–4). – Pp. 175–179.
5. Kannan, S.M. A new selective assembly model for achieving specified clearance in radial assembly / S.M. Kannan, G. Raja Pandian // *Materials Today: Proceedings*, 2021. – Vol. 46 (2021). – Pp. 7411–7417.
6. Cavazzuti, M. Optimization methods: from theory to design / M. Cavazzuti. – Springer, 2013. – 262 p.
7. Rao, S.S. Engineering optimization: theory and practice / S.S. Rao. – 4th ed. – Wiley, 2009. – 830 p.
8. Методы оптимизации: учебник и практикум для вузов / Ф.П. Васильев, М.М. Потапов, Б.А. Будак [и др.]; под ред. Ф.П. Васильева. – М.: Юрайт, 2024. – 375 с.
9. Ржевский, С.В. Математическое программирование: учебное пособие / С.В. Ржевский. – СПб.: Лань, 2019. – 608 с.
10. Филипович, О.В. Модель процесса однопараметрической селективной сборки сложных изделий / О.В. Филипович, А.Г. Карлов, Н.А. Волошина // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2021. – № 5. – С. 398–403. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-398-404. – EDN LZFJDF.
11. Определение количества комплектов при селективной сборке двух элементов с учетом влияния погрешности измерения / О.В. Филипович, Г.В. Невар, Н.А. Волошина, В.О. Филипович // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2023. – № 3. – С. 105–109. – DOI: 10.36652/0202-3350-2023-24-3-105-109. – EDN JMKQCS.
12. Филипович, О.В. Модель процесса одновариантной однопараметрической селективной сборки двух элементов с учетом погрешностей измерения при их сортировке / О.В. Филипович // *Автоматизация и измерения в машино-приборостроении*. – 2023. – № 3 (23). – С. 93–101. – EDN TLIXMR.
13. Филипович, О.В. Оптимизация показателей селективной сборки питателей смазочных систем / О.В. Филипович // *Инженерный вестник Дона*. – 2024. – № 9 (117). – С. 200–209. – EDN МАЕМП.
14. Филипович, О.В. Оптимизация селективного комплектования и сборки игольчатых роликовых подшипников / О.В. Филипович // *Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр.* – Севастополь, 2013. – Вып. 14. – С. 193–200.
15. Филипович, О.В. Оптимизация селективного комплектования и сборки деталей шатунно-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания / О.В. Филипович, Н.А. Волошина // *Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр.* – Вып. 15/2014. – Севастополь, 2014. – С. 212–218.

Секция 3. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ПРОМЫШЛЕННОМ ДИЗАЙНЕ

УДК 004.71

ПАРАМЕТРЫ ЗАДЕРЖЕК И ПОТЕРЬ ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПАКЕТОВ В IP-СЕТЯХ

Батенков К.А., профессор, д.т.н., профессор

*Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Российская Федерация
E-mail: pustur@yandex.ru*

На основе параметров качества функционирования сетей, использующих протокол IP, определены шесть основных классов качества функционирования IP-сетей и два временных. Каждый из них точно задает комбинацию границ показателей качества, при этом любой поток, удовлетворяющий соответствующим требованиям, соотносится с определенным классом.

Ключевые слова: IP-сеть, параметры качества, качество функционирования, задержка, потери

PARAMETERS OF DELAYS AND LOSSES OF TRANSMITTED PACKETS IN IP NETWORKS

Batenkov K.A., Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation
E-mail: pustur@yandex.ru*

Based on the parameters of the quality of functioning of networks using the IP protocol, six main classes of quality of functioning of IP networks and two temporary ones have been identified. Each of them precisely defines a combination of the boundaries of quality indicators, while any stream that meets the relevant requirements corresponds to a certain class.

Keywords: IP network, quality parameters, quality of operation, delay, losses

Рассмотрим параметры качества функционирования сетей, использующих протокол IP (internet protocol – протокол интернет) [1].

Задержка передачи IP пакета τ (IPTD – IP packet transfer delay) – время между двумя соседними событиями поступления или ухода пакета из узла сети, источника, получателя, линии связи, участка сети (сетевое облака) или их некоторой совокупности во времена t_1 и t_2 :

$$\tau = (t_2 - t_1),$$

где $t_2 > t_1$ и $(t_1 - t_2) \leq T_{max}$ [1].

Верхняя граница времени задержки T_{max} определяется исходя из события успешной передачи IP-пакета – если задержка превышает это значение, то пакет считается потерянным. Рекомендованное значение $T_{max} = 3$ с, однако оно может быть изменено в случае исследования больших сетей.

Сквозная задержка передачи IP-пакета (end-to-end IPTD) – односторонняя задержка передачи IP-пакета, измеренная между моментами ухода пакета из источника и доставки этого же пакета получателю.

Среднее значение задержки передачи IP-пакета m_τ – арифметическое среднее задержек передачи IP-пакетов для анализируемой совокупности:

$$m_\tau = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (1)$$

где τ_i – задержка передачи i -го IP-пакета;

n – объем исследуемой выборки (рассматриваются только доставленные пакеты).

Минимальное значение задержки передачи IP-пакета b_τ – минимальное значение среди всех задержек передачи IP-пакетов для анализируемой совокупности:

$$b_\tau = \min_i \tau_i, i = 1, 2, \dots, n.$$

Данная величина включает задержки распространения и буферизации всей исследуемой совокупности пакетов. Вследствие этого данная величина может отличаться от теоретического минимума задержки передачи пакета между заданными точками сети.

Вариация задержки передачи IP-пакета v (*IP packet delay variation – IPDV*) – разность между значением задержки передачи IP-пакета τ и статистической характеристикой задержки передачи исследуемой совокупности пакетов x_τ :

$$v = \tau - x_\tau,$$

где x_τ может быть, например, средним значением передачи IP-пакета m_τ , минимальным значением передачи IP-пакета b_τ и другими статистическими характеристиками задержки.

Отметим, что распределение вариации задержки v идентично смещенному на величину статистической характеристики совокупности x_τ распределению задержки передачи τ . Кроме того, вариация задержки является двухточечной характеристикой и в отличие от одноточечной измеряется относительно двух точек регистрации пакетов.

Квантиль вариации задержки передачи IP-пакета v_h порядка h (*h quantile of IPTD minus the minimum IPTD*) – значение, при котором функция распределения вариации задержки передачи IP-пакета переходит от величин меньших h к величинам большим $h \in (0, 1)$ [2]. При условии упорядоченности в порядке неубывания задержек передачи τ_i , то есть если $\tau_{i+1} \geq \tau_i, i = 1, 2, \dots, n - 1$, квантиль вариации задержки передачи определяется следующим образом:

$$v_h = \tau_{[h \cdot n]} - b_\tau, \tau_{i+1} \geq \tau_i, i = 1, 2, \dots, n - 1,$$

где $[x]$ – округление в большую сторону числа x до ближайшего целого.

Коэффициент потери IP-пакетов p_l (*IP packet loss ratio – IPLR*) – отношение числа потерянных IP-пакетов n_l к общему числу переданных $n + n_l$ (объем исследуемой выборки определяется как сумма доставленных n и потерянных пакетов n_l):

$$p_l = \frac{n_l}{n + n_l}.$$

Потери пакетов могут быть вызваны как переполнением буферов маршрутизаторов на пути следования вследствие резких всплесков поступающей нагрузки, так и возможными искажениями бит в передаваемых пакетах [3, 4].

Коэффициент ошибок в IP-пакетах p_e (*IP packet error ratio – IPER*) – отношение числа принятых IP-пакетов с ошибками n_e к общему числу принятых n (объем исследуемой

выборки определяется как сумма успешно принятых пакетов $n - n_e$ и принятых с ошибками n_e):

$$p_e = \frac{n_e}{n}.$$

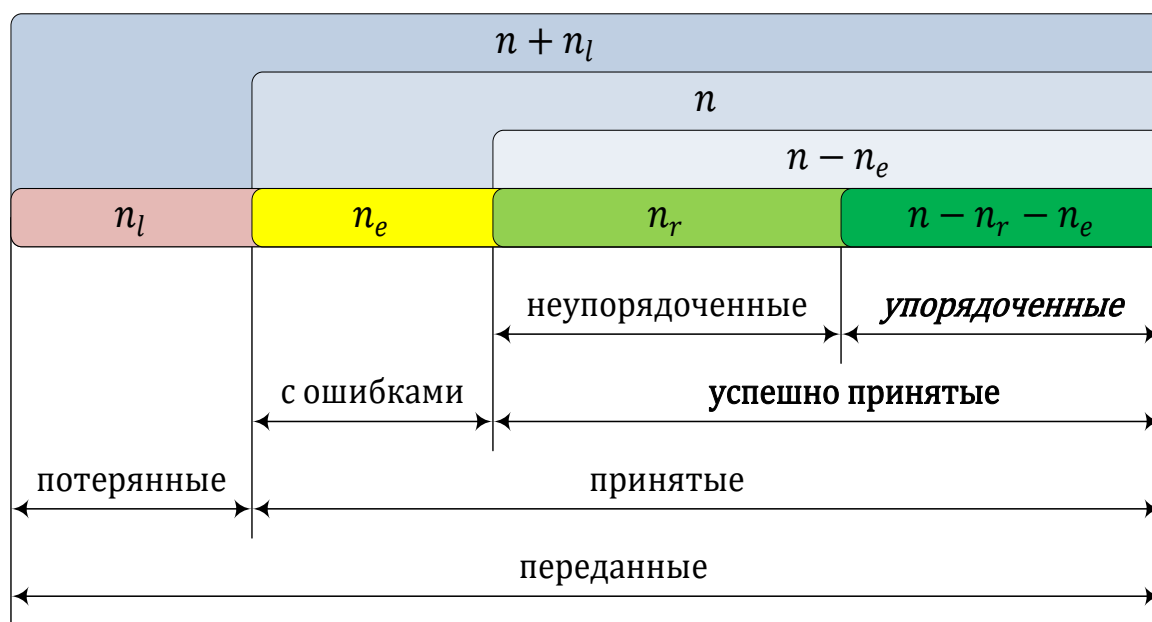
Ошибки при передаче пакетов могут возникать вследствие как плохой помеховой обстановки, так и сетевых факторов, вызванных неточностями процедур дефрагментации и инкапсуляции пакетов.

Коэффициент неупорядоченности IP-пакетов p_r (IP packet reordered ratio – IPRR) – отношение числа непоследовательно принятых IP-пакетов n_r (пришедших к получателю не в том порядке, в котором были переданы) к общему числу успешно принятых $n - n_e$ (объем исследуемой выборки определяется как разность между общим числом принятых пакетов и принятых с ошибками n_e):

$$p_r = \frac{n_r}{n - n_e}.$$

Подобное явление возникает прежде всего вследствие дейтаграммного режима доставки пакетов, что позволяет им проходить по различным маршрутам следования, возможно, отличающимся временами задержки передачи.

Вообще, удобно соотношения между пакетами представить графически (см. рисунок).



Соотношения между передаваемыми пакетами

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Rec. Y.1540. Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters. – 2011–03. – Geneva: ITU-T, 2011. – 52 p.
2. Пугачев, В.С. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / В.С. Пугачев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 496 с.
3. Rec. Y.1541. Network performance objectives for IP based services. – 2006–02. – Geneva: ITU-T, 2006. – 50 p.
4. Батенков, А.А. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий / А.А. Батенков, К.А. Батенков, А.Б. Фокин // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 6 (115). – С. 53–63. – DOI: 10.31799/1684-8853-2021-6-53-63. – EDN AOUANJ.

РОЛЬ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЯКОРНЫХ ШВАРТОВНЫХ ШПИЛЕЙ

Володарский В.С., магистрант

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

Исследуется влияние компьютерного моделирования на процесс проектирования якорных швартовных шпилей с особым акцентом на использование систем автоматизированного проектирования (САД-системы). Подчеркиваются преимущества трехмерного моделирования в плане удобства, эффективности и скорости разработки, а также обсуждается соответствие электронных моделей стандартам Единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

Ключевые слова: компьютерное моделирование, проектирование якорных шпилей, САД-системы, трехмерное моделирование, автоматизированное проектирование, эффективность проектирования, ЕСКД (Единая система конструкторской документации), швартовные шпили

THE ROLE OF COMPUTER MODELING IN THE DESIGN OF ANCHOR MOORING SPIRES

Volodarsky V.S., Master's Degree student

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: v.s.volodarsky@yandex.ru*

This paper examines the impact of computer modeling on the design process of anchor mooring towers, with a special focus on the use of computer-aided design (CAD systems). The article highlights the advantages of three-dimensional modeling in terms of convenience, efficiency and speed of development, and also discusses the compliance of electronic models with the standards of the Unified Design Documentation System (UDDS).

Keywords: computer modeling, design of anchor spires, CAD systems, three-dimensional modeling, computer-aided design, design efficiency, UDDS (Unified system of design documentation), mooring spires

Проектирование якорных швартовных шпилей является критически важным этапом в судостроении, где требуются высокая точность, надежность и соответствие международным стандартам. С появлением компьютерных технологий, особенно систем автоматизированного проектирования (САД-системы), процесс проектирования претерпел значительные изменения. Эти системы предоставляют инструменты для создания, анализа и оптимизации конструкций, что делает их идеальным инструментом для проектирования сложных механических систем, таких как швартовные шпили. В данной статье мы рассмотрим, как трехмерное моделирование улучшает процесс проектирования, делая его более удобным, эффективным и быстрым, при этом не теряя соответствия ЕСКД [1].

1. Преимущества трехмерного моделирования с использованием САД-систем.

1.1. Удобство:

Интуитивный интерфейс: САД-системы часто имеют пользовательский интерфейс, который спроектирован с учетом интуитивности и эффективности. Инженеры и конструкторы могут быстро адаптироваться к работе с программами благодаря логичному расположению инструментов и понятному управлению. Возможность персонализации рабочего пространства под индивидуальные нужды также повышает удобство работы.

Визуализация: трехмерное моделирование позволяет визуализировать конструкцию до ее физического создания, что дает возможность инженерам «увидеть» конечный продукт, оценить его эстетику, функциональность и взаимодействие всех компонентов в сборке. Это значительно облегчает процесс принятия решений о дизайне и конструкции.

1.2. Эффективность:

Анализ и оптимизация: САD-системы предоставляют инструменты для проведения статических и динамических анализов, что позволяет проверять модель на соответствие требованиям к прочности, устойчивости и долговечности. Использование встроенных или интегрированных расчетных программ позволяет оптимизировать конструкцию по весу, материалу и другим параметрам без необходимости создания физических прототипов.

Снижение ошибок: трехмерное моделирование уменьшает количество ошибок, которые могут возникать при ручном проектировании. Цифровая модель позволяет моментально вносить изменения и видеть их последствия, что исключает многие из потенциальных ошибок, связанных с интерпретацией чертежей.

1.3. Скорость:

Автоматизация рутинных задач: САD-системы автоматизируют процесс создания чертежей, спецификаций и другой документации. Функции ассоциативности между моделью и чертежом позволяют изменениям в модели автоматически отражаться в чертежах, что значительно сокращает время, затрачиваемое на их корректировку.

Быстрое прототипирование: возможность быстрого создания и модификации прототипов в виртуальном пространстве ускоряет процесс разработки, позволяя перейти к производству с минимальными задержками. Это особенно важно в условиях, когда время выхода продукта на рынок играет ключевую роль [2].

Интеграция с другими системами: САD-системы поддерживают импорт и экспорт данных в различные форматы, что делает возможной интеграцию с другими инженерными и производственными системами, ускоряя обмен информацией между отделами и партнерами.

2. Соответствие ЕСКД:

2.1. Основные принципы ЕСКД в САD-системах:

Соответствие стандартам: Единая система конструкторской документации (ЕСКД) предусматривает строгие требования к оформлению, содержанию и структуре чертежей, спецификаций и других документов. САD-системы автоматически адаптируют созданные модели и чертежи к этим требованиям, включая форматы листов, масштаб, шрифты, линии и обозначения.

Форматы и размеры: программы поддерживают все стандартные форматы ЕСКД (А4, А3 и т. д.), правильно отображая границы и поля чертежей. Размеры и допуски наносятся строго по стандарту, что упрощает процесс проверки и утверждения документации.

2.2. Создание и управление документацией:

Автоматическое оформление: САD-системы позволяют автоматически генерировать титульные листы, спецификации, ведомости покупных изделий и другие виды конструкторской документации, обеспечивая их полное соответствие ЕСКД. Это включает правильное формирование штампов, нумерацию позиций, оформление таблиц и списков.

Электронная модель как чертеж: одним из ключевых преимуществ является то, что электронная модель в САD-системах сама по себе является полноценным чертежом, соответствующим ЕСКД. Это означает, что все изменения, внесенные в модель, автоматически отражаются в соответствующих чертежах, минимизируя расхождения и ошибки.

2.3. Интеграция и проверка на соответствие:

Интеграция с системами PDM/PLM: САD-системы поддерживают интеграцию с системами управления данными о продукции (PDM) и жизненным циклом продукта (PLM), что позволяет автоматизировать процессы проверки, утверждения и хранения документации. Эти системы обеспечивают контроль версий, совместную работу и отслеживание соответствия всем стандартам, включая ЕСКД.

Автоматическая проверка: программы имеют инструменты для автоматической проверки чертежей на соответствие ЕСКД, что помогает выявить и исправить ошибки на ранних стадиях проектирования, экономя время и ресурсы на доработку.

2.4. Преимущества для производства:

Снижение бумажного документооборота: электронные модели и чертежи, соответствующие ЕСКД, позволяют значительно снизить необходимость в бумажных версиях, ускоряя обмен информацией и уменьшая затраты на печать и хранение документов.

Упрощённое внедрение изменений: любые изменения в конструкции или спецификации могут быть оперативно внесены в модель и автоматически распространяются на всю связанную документацию, что особенно важно при серийном производстве или модернизации существующих изделий.

3. Пример модели швартового шпиля:

3.1. Процесс создания модели:

Начальная стадия: проектирование начинается с создания эскизов в двумерном пространстве, где определяются основные размеры и формы компонентов шпиля. В САД-системах это делается с использованием инструментов для эскизирования, обеспечивая точность размеров и геометрии.

Переход к трехмерной модели: после утверждения эскизов они преобразуются в трехмерные модели. В данном случае каждая деталь швартового шпиля создается как отдельная трехмерная модель, включая барабаны, рамы, механизмы намотки и системы безопасности. Используются такие инструменты, как выдавливание, вращение, вырезание и другие операции моделирования.

Сборка: все детали объединяются в сборочную модель, где проверяется их совместимость и взаимодействие. САД-системы позволяют создавать динамические связи между компонентами, имитируя реальную работу шпиля, например, движение барабана при намотке канатов.

3.2. Анализ функциональности модели:

Прочностной анализ: с использованием инструментов для анализа конструкций модель шпиля подвергается статическим и динамическим нагрузкам для проверки на прочность, сталость материала и возможные деформации. Это позволяет оптимизировать конструкцию для достижения наилучшего соотношения прочности и веса.

Функциональный анализ: проводится имитация работы шпиля в различных режимах и условиях, например, при швартовке в штормовую погоду. Это включает анализ взаимодействия всех компонентов, проверку на износ и проверку механизмов безопасности.

Оптимизация: на основе анализа вносятся изменения в конструкцию для улучшения функциональности, надежности и удобства обслуживания. Например, могут быть изменены размеры или формы деталей для лучшего распределения нагрузок или уменьшения трения.

3.3. Документация:

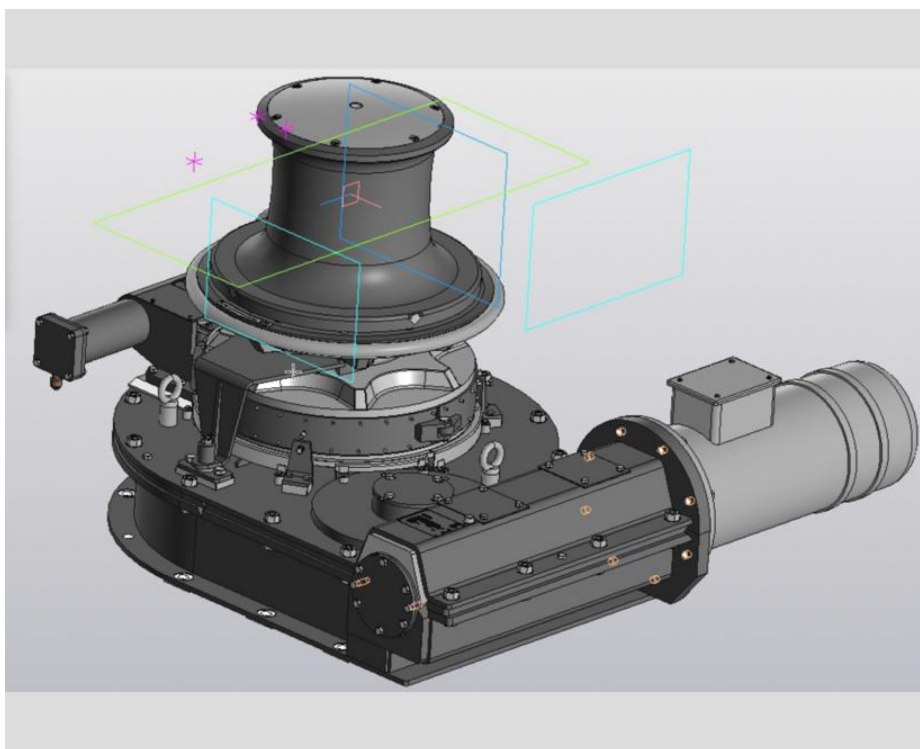
Чертежи и спецификации: после завершения моделирования из трехмерной модели генерируются все необходимые чертежи согласно ЕСКД: общий вид, сборочные чертежи, спецификации, чертежи деталей. САД-системы автоматически применяют все правила оформления, включая нумерацию, обозначения, размеры и допуски.

3D-визуализация: помимо традиционных чертежей САД-системы позволяют создать визуализацию модели, которая может использоваться для презентаций, обучения персонала или в качестве маркетингового материала (см. рисунок). Это особенно полезно для демонстрации работы механизмов и их взаимодействия в реалистичной среде.

3.4. Валидация модели:

Сравнение с реальными данными: после того как модель создана и анализ проведен, ее параметры сравниваются с данными реальных прототипов или существующих аналогов для подтверждения точности моделирования. Это может включать проверку под нагрузкой, испытания на усталость и прочие тесты [3].

Обратная связь: полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего улучшения модели, что делает процесс проектирования итеративным и адаптивным к реальным условиям эксплуатации.



3D-визуализация якорно-швартовного шпилья

4. Практическое применение:

4.1. Влияние на производственный процесс:

Ускорение разработки: использование САД-систем для проектирования швартовных шпильей значительно сокращает время от идеи до готового продукта. Трехмерное моделирование позволяет быстро вносить и визуализировать изменения, проводить симуляции и анализы, что уменьшает время на доработку и исправление ошибок.

Минимизация прототипирования: с точными цифровыми моделями физическое прототипирование может быть сведено к минимуму или даже полностью исключено для некоторых этапов разработки. Это снижает материальные и временные затраты на создание и тестирование прототипов.

Оптимизация производства: электронные модели могут быть напрямую интегрированы с системами ЧПУ для производства деталей, что повышает точность изготовления и уменьшает количество брака. Также это позволяет быстро адаптировать производство при внесении изменений в конструкцию [4].

4.2. Сравнение с традиционными методами:

Снижение ошибок: традиционное проектирование на бумаге или в 2D-программах часто сопряжено с риском ошибок, особенно при сложных составных частях. Трехмерное моделирование позволяет избежать многих из этих ошибок за счет визуальной проверки сборки и взаимодействия компонентов.

Экономия ресурсов: время, затрачиваемое на создание и пересоздание чертежей, значительно сокращается, так как любые изменения в модели автоматически отражаются во всей связанной документации. Это также экономит бумагу, краску и место для хранения физических чертежей.

Улучшение коммуникации: трехмерные модели гораздо понятнее для всех участников процесса – от инженеров до производителей и заказчиков. Это улучшает коммуникацию, уменьшает количество недопониманий и ускоряет принятие решений.

4.3. Реализация на производстве:

Интеграция с PLM/PDM-системами: САD-системы позволяют интегрироваться с системами управления жизненным циклом продукции (PLM) и данными о продукции (PDM), что упрощает процесс контроля версий, отслеживания изменений и управления документацией на всех этапах от разработки до утилизации.

Обучение и обслуживание: трехмерные модели могут быть использованы для обучения персонала, демонстрируя правильное использование, обслуживание и ремонт оборудования. Интерактивные 3D-модели дают возможность визуально и интерактивно изучить устройство шпиль, что особенно полезно для сложных механизмов.

Маркетинг и продажи: визуализации, созданные в САD-системах, могут использоваться в маркетинговых материалах, предлагая клиентам наглядное представление о продукции, ее преимуществах и функциональности до ее физического создания.

4.4. Обратная связь и итеративное улучшение:

Сбор отзывов: по мере использования шпилей в реальных условиях собирается обратная связь от пользователей и производителей, которая может быть использована для дальнейшего улучшения моделей. Это делает проектирование и производство более адаптивными к потребностям рынка.

Итеративный процесс: любые необходимые изменения или улучшения могут быть быстро внесены в цифровую модель, что позволяет поддерживать продукт в актуальном состоянии с минимальными затратами.

Использование САD-систем для проектирования якорных швартовых шпилей демонстрирует значимость современных технологий в повышении качества и эффективности инженерной работы. Трехмерное моделирование не только ускоряет процесс разработки, но и обеспечивает создание продукции, соответствующей строгим техническим стандартам, включая ЕСКД. Таким образом, применение САD-систем в судостроении и других отраслях машиностроения становится не только трендом, но и необходимостью для удержания конкурентоспособности на мировом рынке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов, А.С. Применение систем автоматизированного проектирования в судостроении / А.С. Иванов, В.Б. Петров. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2018. – 76 с.
2. Сидоров, Н.В. Трехмерное моделирование в САD-системах / Н.В. Сидоров, И.А. Кузнецов. – М.: Наука, 2020. – 384 с.
3. Белов, Д.М. Основы трехмерного проектирования в морской инженерии / Д.М. Белов, А.Е. Смирнов. – Владивосток: Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 2019. – 46 с.
4. Захаров, П.А. Анализ и оптимизация конструкций с использованием САD-систем / П.А. Захаров. – Новосибирск: Сибирский федеральный университет, 2021.– 128 с.

ЭВОЛЮЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ДЕЛЬТА-ПРИНТЕРА

Горобец И.А., доцент, к.т.н., доцент, **Горбань В.В.**, аспирант

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

Исследована эволюция функциональных возможностей конструкций параллельных структур с 3–6 степенями подвижности. Предложена параллельная структура 8D-принтера. Разработана кинематическая схема реализации дельта-принтера с 8 степенями подвижности. Приведен пример технологии печати объектов предложенной компоновкой 8D-принтера.

Ключевые слова: эволюция, принтер, конструкция, печать, структура, компоновка, подвижность

EVOLUTION OF DELTA PRINTER FUNCTIONALITY

Gorobets I.A., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Gorban V.V., PhD student

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

The evolution of the functional capabilities of parallel structures with 3–6 degrees of mobility is investigated. A parallel structure of an 8D printer is proposed. A kinematic scheme for the implementation of a Delta printer with 8 degrees of mobility has been developed. An example of object printing technology using the proposed 8D printer layout is given.

Keywords: evolution, printer, construction, printing, structure, layout, mobility

Совершенствование производственной деятельности привело к появлению и дальнейшей реализации аддитивных технологий (англ. Additive Fabrication), заключающихся в наращивании объекта производства за счет послойного увеличения его размеров [1, 2, 3]. В настоящее время интерес представляют FDM-технологии, использующие гибкий филамент с различными физическими свойствами [1, 4]. Реализация аддитивных технологий осуществляется устройствами 3D-печати с разнообразной структурой и компоновкой подвижных элементов и рабочих органов. Некоторые из них (delta-принтеры) основаны на принципах параллельных структур [1, 4, 5]. Известные пространственные механизмы параллельной структуры могут реализовать от трёх до шести степеней свободы рабочего органа (выходного звена). При этом выходное звено может двигаться в различных плоскостях: совершать плоскопараллельное, вращательное движение или содержать их комбинацию.

Среди устройств параллельной структуры с плоскопараллельным движением выходного звена наиболее известно устройство Delta [6]. В каждой кинематической цепи механизма есть привод, который поворачивает рычаг. Оси параллелограмма, связанные с рычагом и выходным звеном, параллельны оси привода соответствующей кинематической цепи. Это обеспечивает выходному звену исключительно плоскопараллельное движение (рис. 1).

Ещё один механизм параллельной структуры, который обеспечивает выходному звену три поступательные степени свободы, был разработан и запатентован Ньюманом [7]. Выходное звено этого механизма закреплено на стержне переменной длины, который соединён с основанием с помощью универсального шарнира. Этот шарнир не позволяет стержню вращаться вокруг своей оси. Три кинематические цепи, состоящие из двух пар вращательных, одной поступательной и одной сферической пары, соединяют выходное звено с основанием (рис. 2).

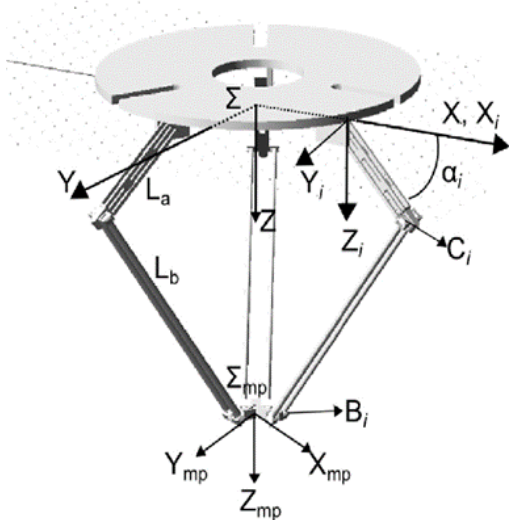


Рис. 1. Схема конструкции механизма «Дельта»

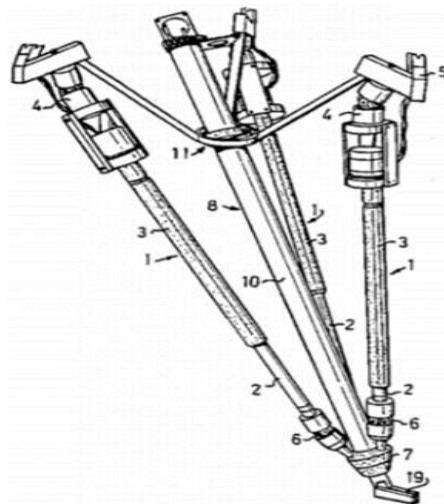


Рис. 2. Схема конструкции механизма Ньюмана

В работах [8, 9] обоснована невозможность создания механизма параллельной структуры с четырьмя степенями свободы, в котором все кинематические цепи имели бы одинаковую структуру. Поэтому такие механизмы обычно имеют специфическую конструкцию, в которой кинематические цепи могут отличаться друг от друга или содержать дополнительные конструктивные элементы, ограничивающие движение выходного звена. Так, в работе [10] предложена схема конструкции устройства Raminsa, использующая механизмы пантографов (рис. 3). Аналогичную задачу решает устройство с двумя кинематическими цепями, разработанное Д. Анджелесом [11] (рис. 4). В этом устройстве каждая кинематическая цепь содержит по два привода.

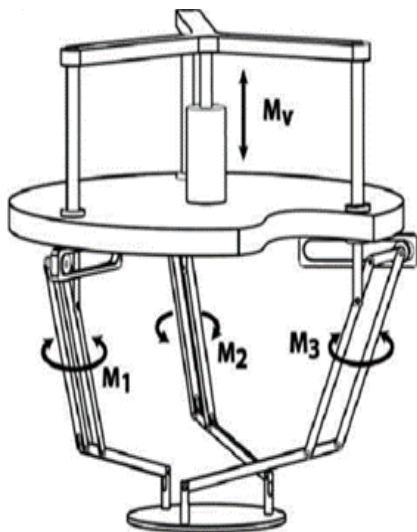


Рис. 3. Структурная схема механизма Р. Аркеяна

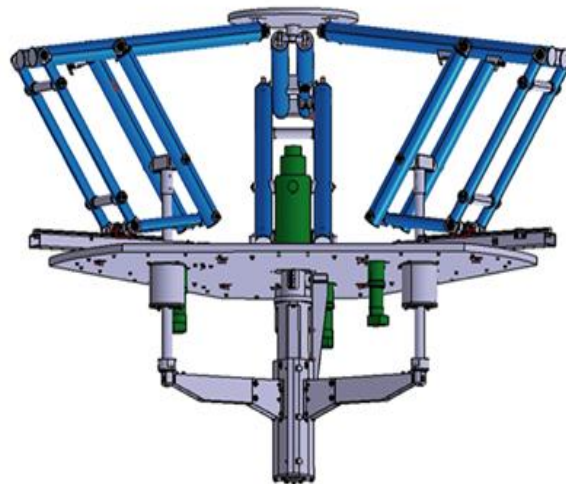


Рис. 4. Модель устройства Д. Анджелеса

Механизмы параллельной структуры с пятью степенями свободы также не могут быть созданы только из одинаковых кинематических цепей. Поэтому они либо включают дополнительные цепи, ограничивающие движение выходного звена, либо используют цепи с разной конструкцией. Механизмы такой структуры нашли своё применение для реализации пятикоординатной обработки материалов резанием в области металлообработки. При этом шестая степень свободы реализована вращением шпинделя станка. Одной из наиболее известных схем таких механизмов является схема пятиосевого станка Metrom [12] (рис. 5). Также

известна схема механизма с пятью степенями свободы, на основе которого был создан медицинский робот Para-BrachyRob [13], предназначенный для проведения брахитерапии (рис. 6).

Схемам конструкций шести осевых параллельных структур посвящено много научных работ, наиболее известные из них: механизм Д. Стюарта для тренажёра по подготовке пилотов, платформа В. Гофа для тестирования колёсно-ступичных узлов автомобилей, механизмы А.Ш. Колисгора [14, 15, 16] (рис. 7).

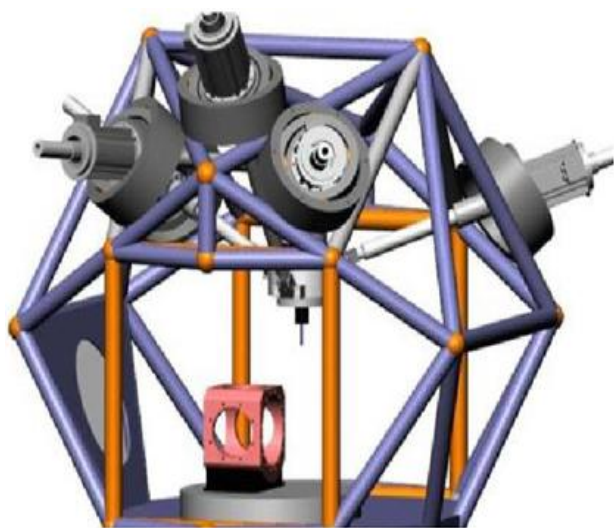


Рис. 5. Модель станка Metrom

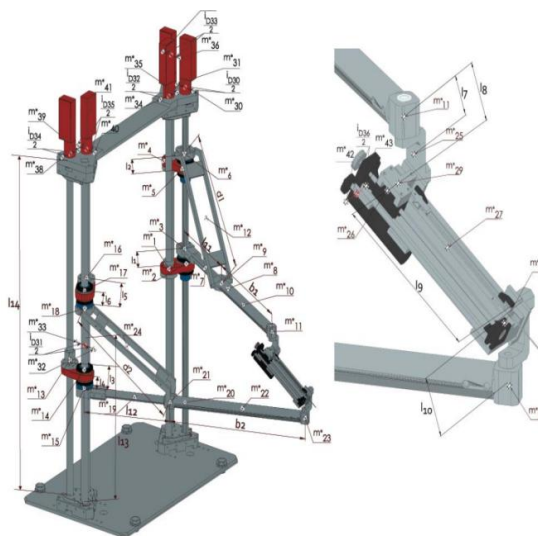


Рис. 6. Модель медицинского робота Para-BrachyRob

Эволюция конструктивных решений механизмов привела к созданию устройств, реализующих наибольшую точность перемещений. Это побудило создание новых конструкций технологических устройств, в том числе и металлорежущего оборудования типа «обрабатывающий центр», обладающих не только повышенной точностью, но и производительностью.

Однако общим недостатком рассмотренных конструкций устройств с 3–6 степенями свободы является ограниченная функциональность, не позволяющая реализовать более сложные движения рабочего органа с целью достижения большей производительности и точности, в том числе и для появления новых технологий печати 3D-принтера. Именно поэтому вопрос увеличения подвижности рабочего органа устройства 3D-печати объектов с использованием FDM-технологий повышенной производительности является в настоящее время актуальным.

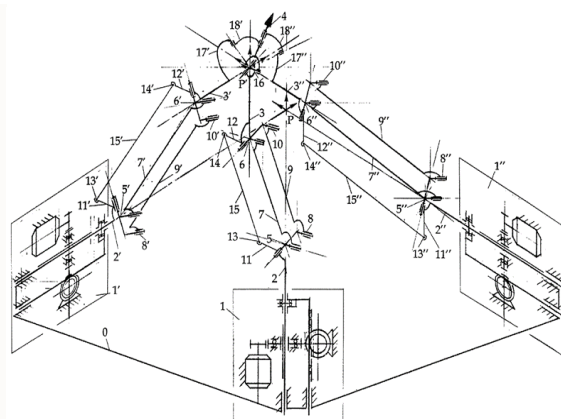


Рис. 7. Общий вид и схема конструкции манипулятора трипода

Для решения задачи увеличения подвижности рабочего органа принтера авторами предложена структурная (рис. 8) и разработана кинематическая (рис. 9) схемы 8D дельта-принтера.

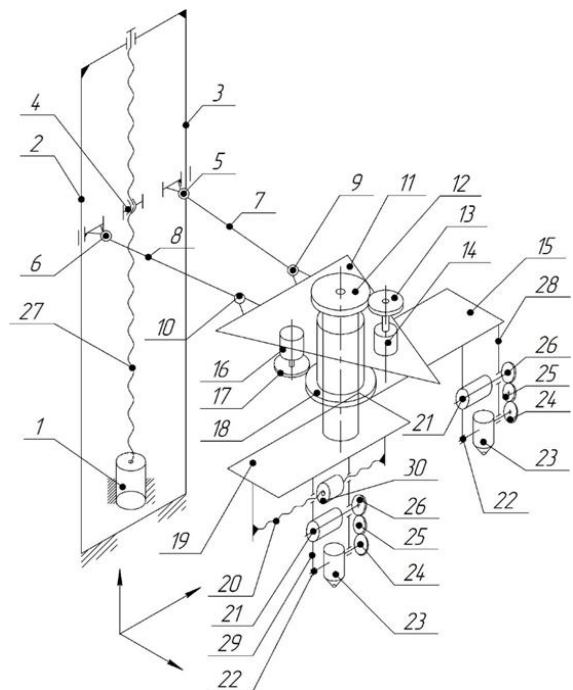
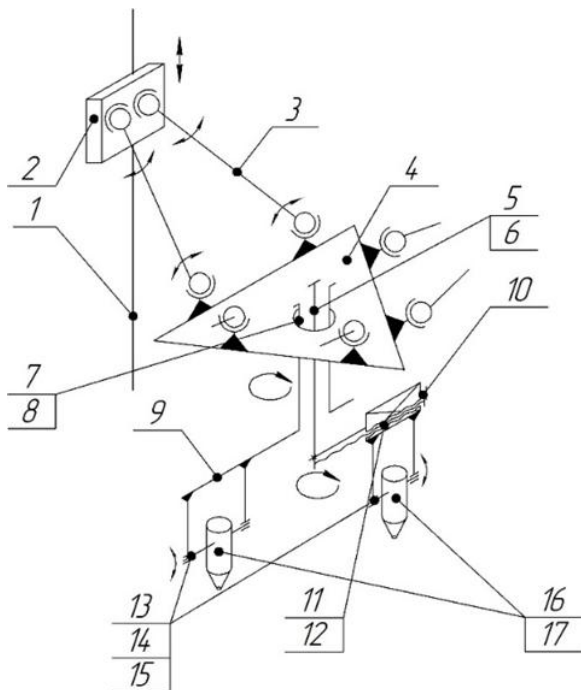


Рис. 8. Структурная схема 8D дельта-принтера Рис. 9. Кинематическая схема 8D дельта-принтера

На кинематической схеме (см. рис. 9) изображены: шаговый двигатель перемещения кареток 1, ходовые винты кареток 27, вертикальные направляющие 2 и 3, каретки 4, шаровые шарниры 6, 5, соединенные с кареткой 4, тяги 7 и 8 с шарово-шарнирными опорами 9, 10, присоединенными к монтажной платформе 11, поворотные платформы 15, 19, вал-шестерня поворота нижней платформы 12, шаговые двигатели поворота платформ 16, 14, шестерни шаговых двигателей 13, 17, шестерня поворота верхней платформы 18, ходовой винт перемещения экструдера 20, корпус неподвижного экструдера 28, корпус подвижного экструдера 29, шаговый двигатель 30 перемещения подвижного экструдера (так как следующие элементы обоих экструдеров идентичны по своей конструкции, они пронумерованы одинаковыми номерами: электродвигатель 21, зубчатые колеса 24, 25, 26, рабочий орган 23, опорная ось экструдера 22). Кинематическая схема дельта-принтера модернизированной конструкции показана только с одной из трёх вертикальных колонн, так как остальные две имеют идентичную структуру.

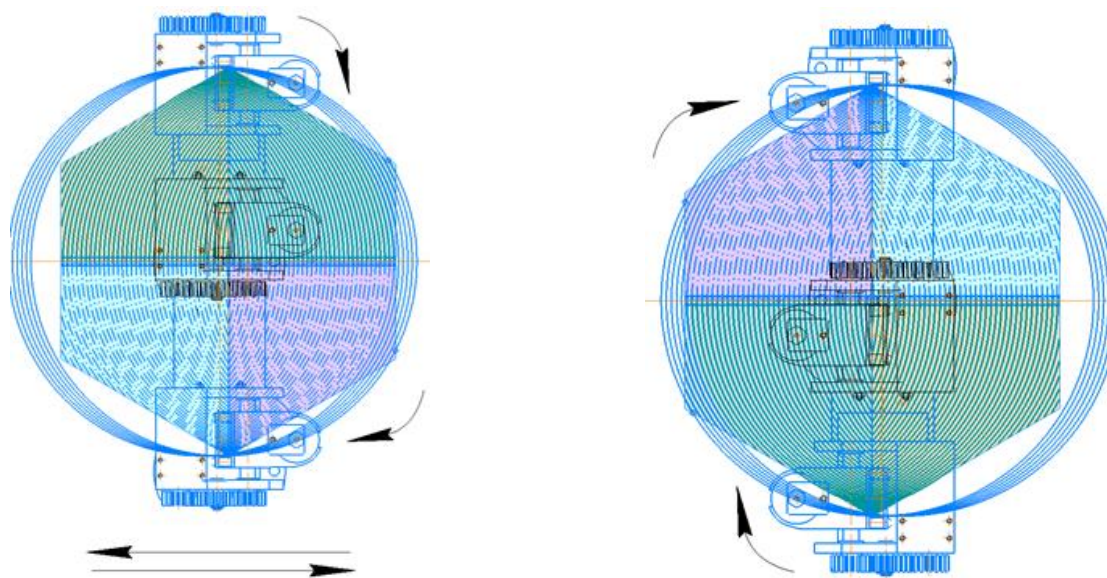


Рис. 10. Траектория заполнения контура детали в полярной системе координат

Увеличение степени свободы рабочих органов дельта-принтера позволили реализовать новые технологии печати (рис. 10). Такая технология реализована следующим образом: контур детали печатается обычным способом, а технология заполнения меняется кардинально. Печатающая платформа устанавливается на заданные координаты, а затем происходит вращательное движение поворотных платформ в области контура детали. Когда осуществляется печать дуги от стенки до стенки контура объекта, печатная платформа совершает линейное перемещение вдоль оси детали и получается новая траектория. Процесс повторяется до заполнения сегмента, затем печатающая платформа занимает зеркальное положение относительно начала печати и происходит печать второго сегмента детали. Реализация разработанных принципов позволяет до 84 % увеличить производительность принтера в сравнении с традиционной технологией печати дельта-принтером за счёт новой технологии заполнения объекта печати.

Выводы

Проанализированы известные схемы механизмов с параллельной структурой, позволяющие выявить эволюцию структур механизмов в связи с решением задачи повышения точности и производительности устройства. Предложены общая структурная и кинематическая схемы 3D дельта-принтера с 8 степенями подвижности с дополнительной печатающей головкой, имеющей возможность одновременной работы с основным экструдером. Предложенная схема конструкции 3D-принтера позволит обеспечить новую технологию печати объектов и повысить производительность устройства печати.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
2. 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.
3. Горобец, И.А. Проектирование и моделирование параметров 3D-принтера параллельной структуры / И.А. Горобец, Д.О. Киселица, Д.С. Жарких // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Самара: СГТУ, 2024. – С. 80–83.
4. Горобец, И.А. Обзор исследований прочности изделий, полученных с использованием FDM-технологий / И.А. Горобец, Н.В. Голубов, Д.А. Пикалов // 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. Type Synthesis of Parallel Mechanisms / X. Kong, C. Gosselin. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 272 p.
6. Clavel, R. DELTA, a Fast Robot with Parallel Geometry / R. Clavel // Proceedings of 18th International Symposium on Industrial Robot. Lausanne. – 1988. – Pp. 91–100.
7. Neumann, K.E. Robot / K.E. Neumann. – US Patent No. 4.732.525. 22 March 1988.
8. Waldron, K.J. Kinematics of a Hybrid Series-Parallel Manipulation System / K.J. Waldron, M. Raghavan, B. Roth // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1989. – Vol. 111. – Iss. 2. – Pp. 211–221.
9. Merlet, J.P. Solving the Forward Kinematics of a Gough-Type Parallel Manipulator with Interval Analysis / J.P. Merlet // The International Journal of Robotics Research. – 2004. – Vol. 23. – Iss. 3. – Pp. 221–236.
10. Arakelian, V. Increase of singularity-free zones in the workspace of parallel manipulators using mechanisms of variable structure / V. Arakelian, S. Briot, V. Glazunov // Mechanism and Machine Theory. – 2008. – Vol. 43. – Pp. 1129–1140.
11. Angeles, D. On the Computation of the Home Posture of the McGill Schoenflies – Motion Generator / D. Angeles, S. Alizadeh, S. Nokleby // Computation Kinematics. Proceedings of the 5th International Workshop. Springer. – 2009. – Pp. 149–158.

12. Schwaar, C. Device for the Displacement and/or Positioning of an Object in Five Axes / C. Schwaar, R. Neugebauer, M. Schwaar // US Patent No. 7.104.746. 30 April 2004.
13. Lin, W. Modeling and Control of Inverse Dynamics for a 5-DOF Parallel Kinematic Polishing Machine / W. Lin, B. Li, X. Yang, D. Zhang // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10. – Iss. 8. – Pp. 103–108.
14. Gough, V.E. Contribution to Discussion of Paperson Research in Automobile Stability, Control and Tyre Performance / V.E. Gough // Proc. Auto Div. Inst. Mech. – 2004. – Pp. 110–117.
15. Husty, M.L. Self-Motions of Griffis-Duffy Type Parallel Manipulators / M.L. Husty, A. Karger // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco. – 2000. – Pp. 7–12.
16. Koliskor, A.S. The 1-coordinate Approach to the Industrial Robots Design / A.S. Koliskor // IFAC Proceedings Volumes. – 1986. – Vol. 19. – Iss. 2. – Pp. 225–232.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДИСКОВ ГТД ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ШАБЛОНА ДЛЯ ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ В NX CAM

Горяинов Д.С., к.т.н., доцент, **Климов А.В.**, магистрант

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

Рассмотрен способ реализации метода групповой токарной обработки деталей в САМ-системе NX путём применения шаблона операции с ЧПУ технологического процесса. Шаблон строится на основе предварительного анализа конструкторско-технологических элементов группы деталей типа «диск» вала ГТД и разработки модели групповой детали. Показан подбор инструмента и разработка переходов обработки. Путём настройки NX САМ шаблон может быть гибко использован прямо из интерфейса программы. Разработанный шаблон может применяться на предприятиях машиностроительной отрасли для унификации процессов обработки и повышения производительности труда технологов-программистов ЧПУ.

Ключевые слова: групповой технологический процесс, ЧПУ, шаблон, NX CAM, ГТД

IMPROVING THE EFFICIENCY OF DEVELOPING NC PROGRAMS FOR TURNING GTE DISCS USING A TEMPLATE FOR GROUP PROCESSING IN NX CAM

Goryainov D.S., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Klimov A.V., Master's Degree student

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

A method for implementing the method of group turning of parts in the NX CAM system by applying a template for a CNC process operation is considered. The template is based on a preliminary analysis of the design and technological elements of a group of parts of the "Disk" type of the GTE shaft and the development of a model of the group part. The selection of the tool and the development of processing transitions are shown. By configuring NX, the template can be flexibly used directly from the software interface. The developed template can be used at enterprises of the mechanical engineering industry to unify machining processes and increase the productivity of CNC technologists and programmers.

Keywords: group technological process, CNC, template, NX CAM, GTE

Метод групповой обработки позволяет унифицировать подходы к построению технологического процесса, а также оптимизировать и сократить количество используемого инструмента, сократить время на переналадку оборудования и ускорить этап технологической подготовки производства. Разработка группового технологического процесса (ТП) выполняется на основе групповой детали, включающей все конструктивно-технологические элементы деталей, отобранных в группу. Операция с ЧПУ разрабатывается в САМ-системе на основе геометрических моделей, поэтому групповая операция на станке с ЧПУ будет выполняться на основе групповой модели.

Групповая обработка требует классификации и группирования деталей. Ключевым становится вопрос получения формального описания обрабатываемой детали в терминах технологических элементов и переходов. В настоящей работе показан подход на основе экспертной оценки и формирования перечня конструкторско-технологических элементов (КТЭ) деталей. Дальнейшим научным направлением может быть применение автоматизированного распознавания КТЭ на модели для отбора деталей в группу и для разработки переходов обработки на основе распознанных КТЭ (Feature Based Machining).

Проведённый анализ возможностей доступных CAD-, CAPP- и CAM-систем показал, что некоторые вендоры уделяют недостаточно внимания интеграции систем. Например, параметры отверстия, построенного в модели в КОМПАС-3D, невозможно автоматически передать и распознать в CAPP Вертикаль при подключении геометрической модели. Хотя эта очевидная возможность – сохранение в файле модели не только граней отверстия, но и отверстия как технологического объекта – открывала бы путь к повышению доли автоматизации при разработке ТП. Выбран NX CAM ввиду тесной интеграции модулей CAD и CAM.

Для отобранных в группу (рис. 1) деталей типа «диск вала ГТД» проанализированы КТЭ. Всего на групповой модели выделено 24 КТЭ. Разработана и построена модель групповой детали (рис. 2).

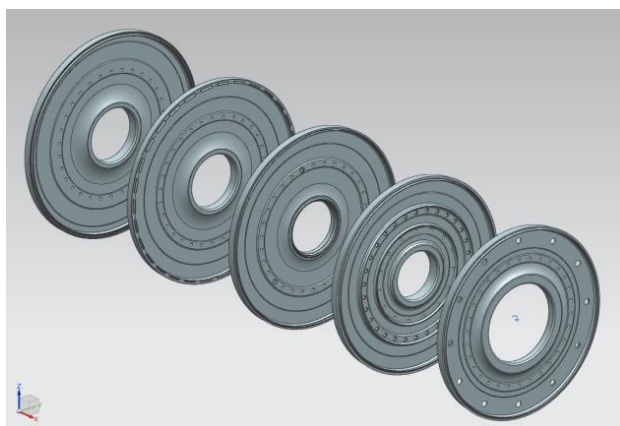


Рис. 1. Отобранные модели деталей группы

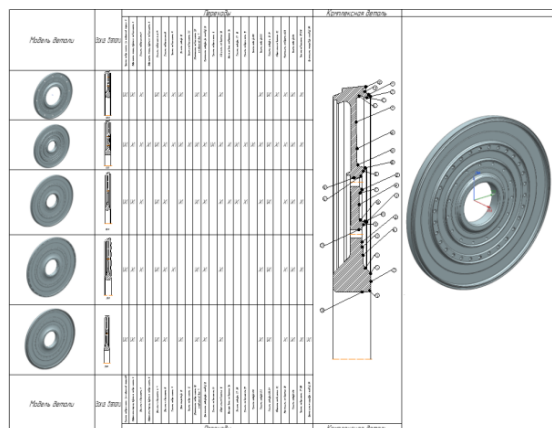


Рис. 2. КТЭ деталей группы и модель групповой детали

Для групповой детали разработан технологический процесс обработки на станке с ЧПУ из 32 переходов обработки с выбором инструментов и назначением режимов (рис. 3).

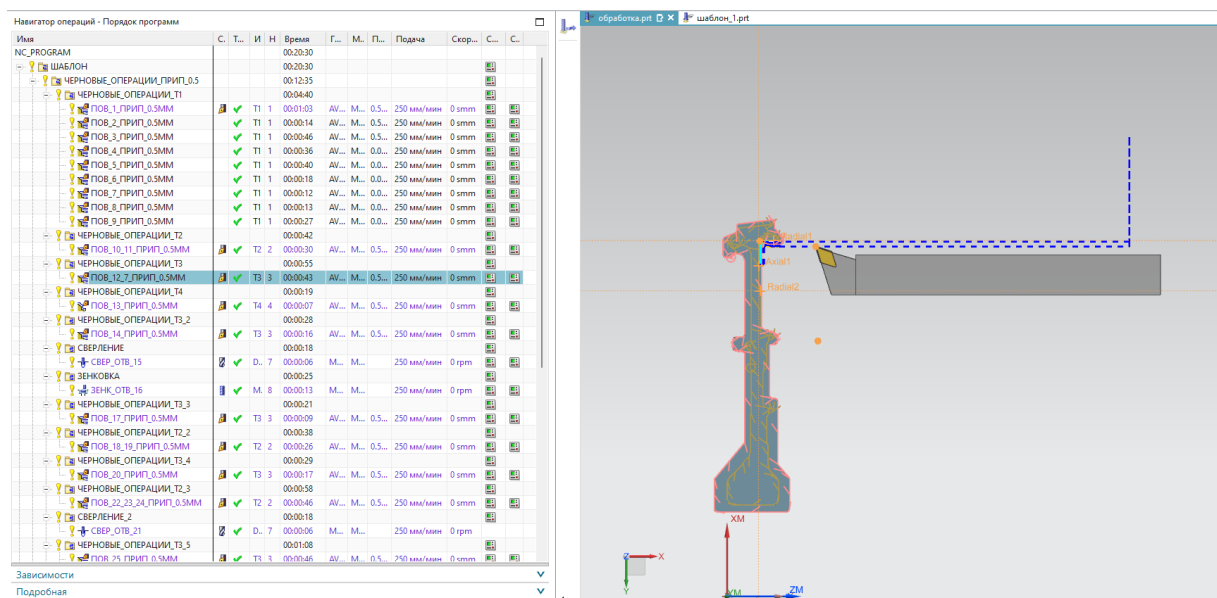


Рис. 3. Пример переходов обработки групповой детали и изображение траектории в NX CAM

Припуски на обработку внесены в разработанные методы (рис. 4). Это позволяет гибко изменять технологический процесс в зависимости от конкретной детали.

Файл обработки был сохранён как шаблон NX CAM для дальнейшего применения его из интерфейса программы.

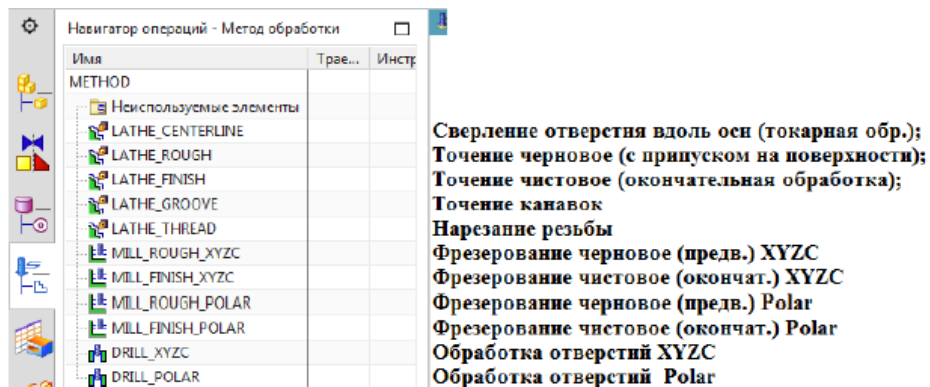


Рис. 4. Методы проекта обработки в NX CAM

В результате применения шаблона к новой детали в проект обработки вставляется:

- структура геометрии;
- перечень инструментов;
- набор операций;
- набор методов обработки.

Работа с проектом обработки после создания по шаблону заключается в переназначении геометрических элементов на конкретной детали, генерации траектории и её контроль.

Использование шаблонов позволяет быстро создавать проекты обработки типовых деталей, что сокращает время на разработку и снижает вероятность ошибок. Шаблоны содержат проверенные решения и рекомендации, которые помогают создавать качественные проекты. Шаблоны позволяют формализовать и повторно использовать знания и опыт разработчиков, что способствует повышению эффективности работы предприятия.

В целом создание проекта обработки детали с использованием шаблона является эффективным инструментом для автоматизации и ускорения процесса разработки.

Были определены некоторые ключевые аспекты, которые следует учитывать при работе с шаблонами для групповой обработки:

1. Влияние сложности проекта: если проект сложный и требует уникальных функций, разработка с нуля может быть предпочтительнее. Если же проект относительно простой и не требует специфических функций, то создание обработки по шаблону будет более эффективным.

2. Опыт разработчиков: Опытные разработчики могут быстрее создавать уникальные решения с нуля, в то время как менее опытные разработчики могут столкнуться с трудностями при разработке сложных систем.

3. Наличие готовых решений: если есть готовые решения, которые можно адаптировать к проекту, создание по шаблону может сэкономить время.

4. Отладка и внедрение: Разработка с нуля требует больше времени на отладку и внедрение. Создание по шаблону может потребовать меньше времени на внедрение, так как используется готовое проверенное решение.

5. Масштабируемость и гибкость: Разработка с нуля позволяет создать проект обработки, который лучше соответствует специфическим требованиям и обеспечивает большую гибкость. Создание по шаблону может обеспечить быстрое начало работы, но ограничивать масштабируемость и адаптивность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Митрофанов, С.П. Групповая технология машиностроительного производства / С.П. Митрофанов. – В 2 т. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1983.
2. Шаблон проекта обработки типовых деталей в NX CAM [Электронный ресурс]. – URL: <https://dzen.ru/video/watch/658994953c349263cd5967b518389966824187664931> (дата обращения: 18.01.2025 г.).
3. Ведмидь, П.А. Программирование обработки в NX CAM / П.А. Ведмидь, А.В. Сулинов. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 304 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОЛНОСВЯЗНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Казаков М.С., заместитель начальника цеха – начальник лаборатории, к.т.н.

*АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара, Российская Федерация
E-mail: kazakov.mishel@gmail.com*

Рассмотрены современные методы и алгоритмы машинного обучения, выполнена оценка их эффективности в моделировании зависимостей между исходными параметрами композиционного материала и его механическими свойствами. Описаны этапы подготовки данных, включая сбор, очистку и выбор признаков. Показано, что использование машинного обучения имеет существенный потенциал для ускорения процесса разработки новых материалов, оптимизации существующих, а также снижения затрат на экспериментальные исследования.

Ключевые слова: машинное обучение, анализ данных, нейронные сети, композиционные материалы

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS AND FULLY CONNECTED NEURAL NETWORKS TO PREDICT PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS

Kazakov M.S., Deputy Head of Workshop – Head of Laboratory, PhD in Engineering Sciences

*JSC “RSC “Progress”, Samara, Russian Federation
E-mail: kazakov.mishel@gmail.com*

Modern methods and algorithms of machine learning are considered, their efficiency in modeling dependencies between the initial parameters of a composite material and its mechanical properties is assessed. The stages of data preparation, including collection, cleaning and selection of features, are described. It is shown that the use of machine learning has significant potential for accelerating the process of developing new materials, optimizing existing ones, and reducing the costs of experimental research.

Keywords: machine learning, data analysis, neural networks, composite materials

Технология композиционных материалов (КМ) позволила решить насущный в авиации и двигателестроении вопрос уменьшения веса и повышения эксплуатационных характеристик. Несмотря на это, внедрение технологии в производство осложняется некоторыми причинами, такими как:

- дороговизна изготовления деталей из КМ, поскольку без промежуточного численного моделирования физической прототип является единственным способом проверить качество и свойства конечного продукта, что возможно уже в самом конце процесса разработки;
- проблема выявления свойств композиционного материала и их дальнейшего использования в моделировании и прогнозировании поведения, исследования прочностных свойств и надежности изделия в целом;
- сложность задач прогнозирования свойств композиционных материалов, что также связано с их существенной анизотропией [1].

В связи с этим возникает необходимость в разработке методов и технологий, которые позволят сократить время и средства, необходимые для создания новых материалов. Одним из основных методов является прогнозирование конечных свойств новых материалов [2, 3, 4]. Это позволяет ускорить процесс исследований, уменьшить затраты на эксперименты и сделать процесс создания новых материалов более эффективным и безопасным.

В этом контексте машинное обучение представляет собой мощный инструмент, способный значительно улучшить процессы анализа и прогнозирования. Машинное обучение – это область искусственного интеллекта, занимающаяся разработкой алгоритмов и моделей, которые позволяют компьютерам обучаться на основе данных и делать предсказания или принимать решения без явного программирования. Используя методы машинного обучения, можно выявлять сложные зависимости между различными параметрами композитных материалов и их свойствами, что открывает новые возможности их разработки и применения [5, 8].

В данной работе исследованы современные подходы к применению машинного обучения для симуляции свойств композиционного материала с матрицей из базальтопластика и нашивками из углепластика на основе данных о характеристиках входящих компонентов, предоставленных Центром НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Имеются данные о начальных свойствах компонентов композиционного материала (количество связующего, наполнителя, температурный режим отверждения и т. д.). В результате необходимо спрогнозировать ряд конечных свойств получаемых композиционных материалов.

Представлены основные алгоритмы и методы, а также проанализированы примеры успешного использования машинного обучения. Исследование направлено на то, чтобы продемонстрировать, как машинное обучение может стать ключевым инструментом в создании более эффективных и надежных материалов, способствуя тем самым развитию будущих технологий. Обработка данных и разработка моделей машинного обучения осуществлялись с помощью языка программирования Python с применением библиотек.

Описание признаков набора данных приведено на рис. 1. Все признаки имеют тип float64 (числа с плавающей точкой), кроме «Угол нашивки, град». «Угол нашивки, град» имеет тип int64 (целочисленные значения). Все признаки, кроме «Угол нашивки, град», являются непрерывными, количественными. «Угол нашивки, град» принимает только два значения. Пропусков в данных нет (см. рис. 1).

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Index: 23 entries, 0 to 22
Data columns (total 13 columns):
#   Column                                     Non-Null Count  Dtype
---  -
0   Соотношение матрица-наполнитель          23 non-null     float64
1   Плотность, кг/м3                          23 non-null     float64
2   модуль упругости, ГПа                     23 non-null     float64
3   Количество отвердителя, м.%               23 non-null     float64
4   Содержание эпоксидных групп,%_2          23 non-null     float64
5   Температура вспышки, C_2                  23 non-null     float64
6   Поверхностная плотность, г/м2            23 non-null     float64
7   Модуль упругости при растяжении, ГПа     23 non-null     float64
8   Прочность при растяжении, МПа            23 non-null     float64
9   Потребление смолы, г/м2                  23 non-null     float64
10  Угол нашивки, град                         23 non-null     int64
11  Шаг нашивки                                23 non-null     float64
12  Плотность нашивки                          23 non-null     float64
dtypes: float64(12), int64(1)
memory usage: 2.5 KB
```

Рис. 1. Описание признаков набора данных

По результатам анализа визуализаций можно сделать вывод, что почти все признаки, кроме «Угол нашивки, град», распределены ненормально и принимают неотрицательные значения. «Угол нашивки, град» принимает значения только – 0 и 90. Дополнительно выполнен анализ описательной статистики данных.

Рассмотрены два метода выявления выбросов для имеющихся признаков: метод трёх сигм и метод межквартильного интервала. С помощью этих методов было найдено:

- 3 выброса методом трёх сигм;
- 59 выбросов методом межквартильного интервала расстояний.

Для наиболее эффективной работы моделей воспользуемся методом межквартильного интервала. Значения, определенные как выбросы, удаляем, затем удаляем строки с пропущенными значениями. После очистки от выбросов в наборе данных осталось 11 строк. Выявить связь между признаками можно при помощи матрицы корреляции. Несмотря на небольшое количество имеющихся данных, для обучения моделей они могут быть использованы в таком количестве, так как присутствует выраженная корреляция между рядом признаков. При этом необходимо отметить, что полученные результаты будут непригодны для промышленного применения без дополнительного исследования с использованием большего массива данных.

Предсказание значений вещественной, непрерывной переменной – это задача регрессии. Эта зависимая переменная должна иметь связь с одной или несколькими независимыми переменными, называемых также предикторами или регрессорами. Регрессионный анализ помогает понять, как «типичное» значение зависимой переменной изменяется при изменении независимых переменных. В настоящей работе рассмотрены следующие методы машинного обучения: линейная регрессия (*LinearRegression*), Лассо (*LASSO*) регрессия, случайный лес (*RandomForest*), метод *k*-ближайших соседей (*KNeighborsRegressor*), метод опорных векторов для регрессии (*SVR*), градиентный бустинг, деревья решений (*Decision Trees*), нейронная сеть.

С целью повышения качества обучения моделей была выполнена предобработка данных – нормализация – таким образом, чтобы все значения находились в диапазоне от -1 до 1. После использования метода *MinMaxScaler* данные были нормализованы (шкалированы/масштабированы), теперь признаки могут быть переданы на вход машинного обучения.

Следующий этап выполнения работы – это разработка и обучение предсказательных моделей. Исходные данные были разделены по целевым признакам, а также на тренировочные и тестовые.

Опробованы восемь методов (включая нейросеть) для прогнозирования двух целевых признаков: «Модуль упругости при растяжении, ГПа» и «Прочность при растяжении, МПа».

Для того чтобы воспользоваться методами обучения моделей, необходимо разделить набор данных на входную часть, в которую входят все данные, кроме целевых. Необходимо исключить весь столбец, который будет прогнозироваться, и сохранить это множество как входную (*X*) часть. Затем нужно, наоборот, оставить только столбец, в который входят все целевые значения, и сохранить данное множество как выходную (*y*) часть. Эти манипуляции позволят применить метод *train_test_split* из библиотеки *sklearn*, который разделит наши части на тренировочные и тестовые множества. Все вышеописанные действия деления выборки на входную, выходную, а также тренировочную и тестовую часть представлены на рис. 2.

```
# Признаки для 1-й задачи
y1_columns = ['Модуль упругости при растяжении, ГПа']
x1_columns = [
    'Соотношение матрица-наполнитель',
    'Плотность, кг/м3',
    'модуль упругости, ГПа',
    'Количество отвердителя, м.%',
    'Содержание эпоксидных групп,%_2',
    'Температура вспышки, C_2',
    'Поверхностная плотность, г/м2',
    'Потребление смолы, г/м2',
    'Угол нашивки',
    'Влаг нашивки',
    'Плотность нашивки'
]

y1 = df_minmax.loc[:, y1_columns]
x1 = df_minmax.loc[:, x1_columns]

#разбиение на обучающую и тестовую выборки для прогноза модуля упругости при растяжении
X_train_upr, X_test_upr, y_train_upr, y_test_upr = train_test_split(x1, y1, test_size=0.3, random_state=1)
```

Рис. 2. Разделение выборки на входное, выходное, тренировочное и тестовое множества

Некоторые методы машинного обучения являются непараметрическими, то есть полностью зависят от данных и не имеют гибких настроек, что не позволяет нам улучшить результаты модели для конкретной задачи путём подбора гиперпараметров. В настоящей работе используются и те, и другие методы, поэтому взглянем на примеры процесса обучения тех и других моделей. На рис. 3, а представлен пример обучения модели методом классической линейной регрессии (*LinearRegression*). Далее, на рис. 3, б, представлен пример обучения модели методом дерева решений (*DecisionTreeRegressor*) уже с подбором гиперпараметров.

```
#Линейная регрессия
lr = LinearRegression()

#обучаем модель для предсказания признака "Модуль упругости при растяжении"
lr.fit(X_train_upr, y_train_upr.iloc[:, 0])
lr_pred_upr = lr.predict(X_test_upr)
lr_mae_upr = mean_absolute_error(lr_pred_upr, y_test_upr)
lr_mse_upr = mean_squared_error(y_test_upr, lr_pred_upr)
lr_mape_upr = metrics.mean_absolute_percentage_error(lr_pred_upr, y_test_upr)
lr_r2_train_upr = lr.score(X_train_upr, y_train_upr)
lr_r2_upr = r2_score(y_test_upr, lr_pred_upr)
print('LinearRegression Results')
print(f'mae: {lr_mae_upr.round(3)}')
print(f'mse: {lr_mse_upr.round(3)}')
print(f'R^2 на тренировочной выборке: {lr_r2_train_upr.round(3)}')
print(f'R^2 на тестовой выборке: {lr_r2_upr.round(3)}')
print(f'MAPE: {lr_mape_upr.round(3)}')

dtr = DecisionTreeRegressor(criterion='squared_error', max_depth=1, max_features=1, splitter='best')
dtr.fit(X_train_upr, y_train_upr.iloc[:, 0])
dtr_pred_upr = dtr.predict(X_test_upr)
dtr_mae_upr = mean_absolute_error(dtr_pred_upr, y_test_upr)
dtr_mse_upr = mean_squared_error(y_test_upr, dtr_pred_upr)
dtr_mape_upr = metrics.mean_absolute_percentage_error(dtr_pred_upr, y_test_upr)
dtr_r2_train_upr = dtr.score(X_train_upr, y_train_upr)
dtr_r2_upr = r2_score(y_test_upr, dtr_pred_upr)
print('DecisionTreeRegressor Results')
print(f'mae: {dtr_mae_upr.round(3)}')
print(f'mse: {dtr_mse_upr.round(3)}')
print(f'R^2 на тренировочной выборке: {dtr_r2_train_upr.round(3)}')
print(f'R^2 на тестовой выборке: {dtr_r2_upr.round(3)}')
print(f'MAPE: {dtr_mape_upr.round(3)}')
```

а

б

Рис. 3. Обучение модели методом линейной регрессии для предсказания признака «Модуль упругости при растяжении, ГПа»

Для поиска гиперпараметров по сетке использован метод *GridSearchCV* из библиотеки *sklearn*. Он получает на вход метод, выбранный нами для решения нашей задачи (регрессор), и набор параметров для поочерёдной передачи их регрессору, затем выполняет обучение и определяет лучшую комбинацию, что называется гиперпараметрами. Полученные гиперпараметры были установлены в регрессор, после этого выполнено сохранение модели.

Для построения нейросети воспользуемся библиотекой *tensorflow*. Строим полносвязную нейронную сеть, в которую входит три скрытых слоя: один с 100 нейронами и два по 8 нейронов с функцией активации *relu* и один выходной слой с функцией активации *linear*. Данная архитектура была выбрана исходя из анализа литературных данных и статей, где были приведены примеры решения подобных задач прогнозирования.

В качестве оптимизатора берём «Adam», в качестве функции потерь берём *mse*. Пример архитектуры нейросети приведен на рис. 4.

```
... Model: "sequential_4"
...


| Layer (type)     | Output Shape | Param # |
|------------------|--------------|---------|
| dense_16 (Dense) | (None, 100)  | 1,200   |
| dense_17 (Dense) | (None, 8)    | 808     |
| dense_18 (Dense) | (None, 8)    | 72      |
| dense_19 (Dense) | (None, 1)    | 9       |



```
... Total params: 2,089 (8.16 KB)
... Trainable params: 2,089 (8.16 KB)
... Non-trainable params: 0 (0.00 B)
```


```

Рис. 4. Архитектура нейросети

Запуск обучения нейросети выполнен со следующими параметрами: пропорция разбиения данных на тестовые и валидационные 10 %, количество эпох 150. График обучения нейросети приведен на рис. 5.

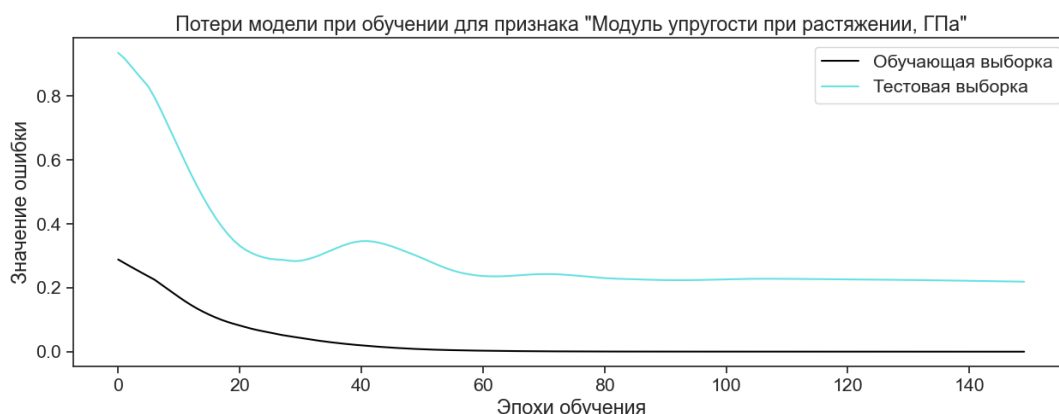


Рис. 5. График обучения нейросети

Существует множество различных метрик качества. В данной работе использованы: MAE (*Mean Absolute Error*), или средняя абсолютная ошибка, MSE (*Mean Squared Error*), или среднеквадратичная ошибка, MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*), или средняя абсолютная процентная ошибка, R^2 , или коэффициент детерминации.

R^2 в норме принимает положительные значения. Эту метрику надо максимизировать. Отрицательные значения коэффициента детерминации означают плохую объясняющую способность модели.

Результаты работы моделей для прогноза признаков: «Модуль упругости при растяжении, ГПа», «Прочность при растяжении, МПа», представлены в виде таблицы.

Результаты обучения моделей для прогноза целевых признаков

| Метод | MAE | MSE | R^2_{train} | R^2 | MAPE |
|--------------------------------------|------|------|---------------|-------|------|
| Модуль упругости при растяжении, ГПа | | | | | |
| RandomForest | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| K_Neighbors | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| LCV | 0.01 | 0.01 | 0.99 | 0.99 | 0.50 |
| LinearRegression | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.98 | 0.52 |
| Neural Network | 0.20 | 0.05 | 0.87 | 0.76 | 0.68 |
| GradientBoosting | 0.45 | 0.45 | 0.19 | 0.17 | 1.02 |
| DecisionTree | 0.50 | 0.50 | 0.56 | -0.25 | 0.66 |
| SVR | 0.50 | 0.50 | -0.44 | -0.64 | 4.99 |
| Прочность при растяжении, МПа | | | | | |
| RandomForest | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| K_Neighbors | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| LCV | 0.01 | 0.01 | 0.99 | 0.99 | 0.50 |
| LinearRegression | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.98 | 0.52 |
| Neural Network | 0.17 | 0.04 | 0.93 | 0.81 | 0.68 |
| GradientBoosting | 0.37 | 0.37 | 0.62 | 0.44 | 1.02 |
| DecisionTree | 0.33 | 0.33 | 0.22 | 0.33 | 0.66 |
| SVR | 0.50 | 0.50 | -0.44 | -0.64 | 4.99 |

Проведенное исследование позволило разработать рабочие модели, которые демонстрируют определённый потенциал в решении задач прогнозирования конечных свойств композиционных материалов. Однако ограниченность исходных данных существенно сказывается на надежности и обобщаемости полученных результатов. Для достижения более точных и устойчивых моделей необходимо провести дополнительные исследования с использованием значительно большего объема данных. Это позволит не только улучшить качество моделей, но и расширить их применение в практических сценариях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов, Д.А. Композиционные материалы: учебное пособие для вузов / Д.А. Иванов, А.И. Ситников, С.Д. Шляпин; под ред. А.А. Ильина. – М.: Юрайт, 2019. – 253 с.
2. Interpretable machine learning methods to predict the mechanical properties of ABX₃ perovskites / S.B. Akinpelu et al. // Results in Physics. – 2024. – Vol. 65. – 107978.
3. Вережбовский, Г.Б. Прогнозирование физических свойств многокомпонентных композитных материалов с полимерной матрицей / Г.Б. Вережбовский // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 7.
4. Применение алгоритмов машинного обучения в прогнозе результата пиролитического анализа / Тхи Ныт Сьонг Ле, А.В. Бондарев, Л.И. Бондарева, А.С. Монакова, А.В. Баршин // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2020. – 63(6):8. – С. 19.
5. Ахметсафин, Р.Д. Применение методов машинного обучения для прогноза или замещения недостающих каротажных данных / Р.Д. Ахметсафин, Р.З. Ахметсафина // Изв. вузов. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 7. – С. 532–541.
6. Дэви, Силен. Основы Data Science и Big Data / Силен Дэви, Мейсман Арно, Али Мохамед // Python и наука о данных. – СПб.: Питер, 2017. – 336 с.
7. Грас, Д. Data Science. Наука о данных с нуля / Д. Грас; пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2021. – 416 с.
8. Лутц, М. Изучаем Python / М. Лутц; пер. с англ. – Т. 1. – 5-е изд. – СПб.: ООО «Диалектика», 2019. – 832 с.

РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ УНИВЕРСАЛЬНОГО КАЛЕНДАРЯ

Киселева М.И., студент

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: mari110603@mail.ru*

Проведено исследование, посвященное японским достопримечательностям и культуре, а также особенностям значения цветовой палитры. Разработаны эскиз и трехмерная модель «Универсального календаря», определены его функциональное назначение и эстетические характеристики. Выбран материал и метод изготовления, учитывающие особенности геометрии и свойства материала изделия.

Ключевые слова: календарь, Япония, 3D-модель, фанера, 3D-моделирование, способ изготовления, лазерный станок, фрезерный станок

DEVELOPMENT OF A 3D MODEL OF A UNIVERSAL CALENDAR

Kiseleva M.I., student

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: mari110603@mail.ru*

A study was conducted on Japanese attractions and culture, as well as features of the color palette value. A sketch was developed and a three-dimensional model of the “Universal Calendar” was developed. Its functional purpose and aesthetic characteristics are determined. The material and manufacturing method that take into account the features of the geometry and material properties of the product are selected.

Keywords: calendar, Japan, 3D model, plywood, 3D modeling, manufacturing method, laser machine, milling machine

В современном мире всё больше людей сталкиваются с необходимостью эффективно управлять своим временем. Time Management – это искусство, которое позволяет рационально использовать свои ресурсы и время.

«Универсальный календарь» – многофункциональный инструмент, объединяющий в себе несколько функций: часы, вечный календарь и меловую доску. Он не только украсит интерьер, но и станет незаменимым помощником в планировании дел и создании заметок.

Дисковый вечный календарь – это устройство, состоящее из нескольких вращающихся дисков, которые, взаимодействуя друг с другом, обеспечивают точное определение даты. Принцип работы вечных календарей заключается в ежедневном повороте соответствующих дисков на нужную грань, что позволяет установить актуальную дату и определить день недели.

Меловая доска – это многофункциональный инструмент, который можно использовать для записи формул, графиков и диаграмм. Она также незаменима во время совещаний и презентаций. Меловую доску можно разместить в различных помещениях: на кухне, в кабинете, спальне, детской комнате, гостиной или прихожей.

Настенные часы не только показывают время, но и служат украшением интерьера. В зависимости от дизайна они могут подчеркнуть стиль, изысканность, характер и даже род деятельности владельца.

Этот календарь выполнен в традиционном японском стиле и является прекрасным отражением культуры этой страны. На заднем плане мы видим величественную гору Фудзияму, а также сакуру – одно из самых прекрасных деревьев Японии (рис. 1, 2).

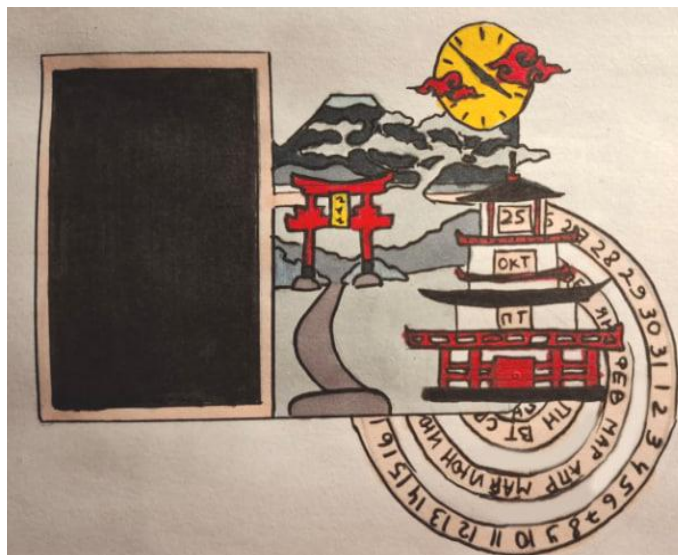


Рис. 1. Эскиз универсального календаря в японском стиле



Рис. 2. Фотографии горы Фудзияма, пагоды Сэйганто-дзи, ворот тории и сакуры

В центре календаря находятся тории – традиционные японские ворота, которые часто можно увидеть у входа в синтоистские храмы или внутри них [1]. Сбоку располагается вечный календарь, изображающий достопримечательность Японии, пагода Сэйганто-дзи – тендайский буддийский храм, расположенный в префектуре Вакаяма, Япония [2]. Также на календаре можно увидеть облака в японском стиле, которые называются «эгасуми» (рис. 3).

В оформлении календаря использованы традиционные цвета японской культуры: белый символизирует свет, чистоту, святость и благословение; чёрный ассоциируется с мощью и непобедимостью; красный считается цветом защиты от зла и бедствий, но также ассоциируется с огнём; золотой символизирует богатство и престиж и часто используется в качестве украшения.

Процесс моделирования изделия осуществляется с применением программы *SolidWorks*, которая отличается удобством интерфейса, реалистичностью визуализации и преподаётся в Самарском государственном техническом университете [3].

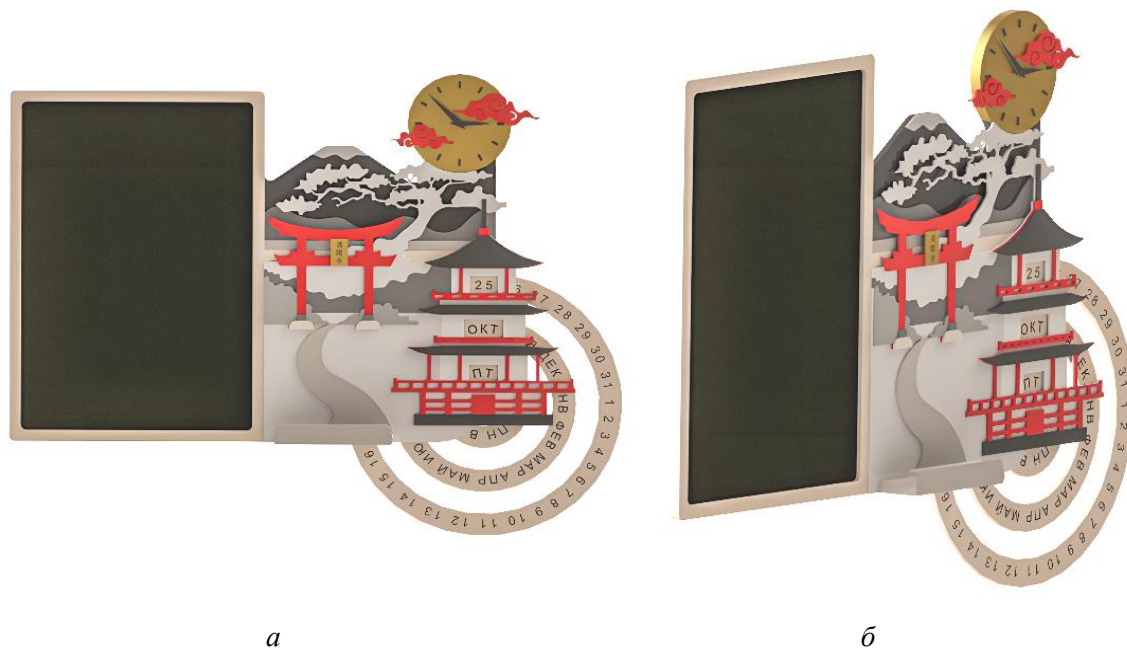


Рис. 3. Реалистичная визуализация 3D-модели универсального календаря в разных видах:
а – фронтальный вид; б – вид 3/4

Процесс создания универсального календаря осуществляется путём лазерного раскроя листов фанеры с использованием лазерного станка с числовым программным управлением CO₂ КАМАСНII 1290 RT130, а также фрезерной обработки на фрезерном станке с числовым программным управлением SUDA SD1212. Этот метод обладает рядом преимуществ: обработка полностью автоматизирована и осуществляется в соответствии с заранее заданным алгоритмом, что исключает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором. Разрезы, выполненные с помощью станков, получаются ровными и гладкими, что позволяет избежать дополнительной обработки. Кроме того, станки с числовым программным управлением способны создавать сложные геометрические формы, включая микроразрезы шириной всего 0,01 миллиметра. Дерево, обработанное на таких станках, сохраняет свою эстетическую привлекательность и не деформируется [4, 5, 6].

После того как каждый лист фанеры был раскроен, листы подвергаются процессу склеивания. Для этого используется специальный столярный клей, предназначенный для работы с древесиной. Далее следует этап покраски и нанесения слоя лака.

Для изготовления изделия была выбрана высококачественная берёзовая фанера ФК сорта 1/2. Это фанера, которая используется с карбамидоформальдегидным клеем. В процессе производства фанеры ФК применяются исключительно природные компоненты, что обеспечивает её экологичность и безопасность для человека. Этот материал легко поддаётся обработке с помощью обычных инструментов: его можно резать, шлифовать и сверлить без применения специализированного оборудования. Фанера ФК обладает приятной фактурой и нежным оттенком, что делает её идеальным выбором для оформления интерьеров и внутренней отделки помещений.

В ходе работы было проведено исследование, посвящённое японским достопримечательностям и культуре, а также особенности восприятия цветовой палитры. Результатом исследования стал эскиз и трёхмерная модель «Универсального календаря». Были определены его функциональное назначение и эстетические характеристики. Также были выбраны материал и метод изготовления, учитывающие особенности геометрии и свойства материала изделия.

В результате было разработано универсальное и многофункциональное изделие, которое может служить не только элементом декора, но и эффективным инструментом для планирования, организации и записи информации (рис. 4).



Рис. 4. Реалистичная визуализация 3D-модели универсального календаря в интерьере

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Родионов, В.А. Моделирование обработки матрицы для получения рельефного оттиска на тонколистовом материале / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Молодежная наука: вызовы и перспективы: материалы II Всерос. научно-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Сызрань, 2019. – С. 128–130.
2. Родионов, В.А. Моделирование рельефной матрицы для получения оттиска на тонколистовом материале в программе SolidWorks / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Высокие технологии в машиностроении: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2018. – С. 112–115.
3. Ворота Тории [Электронный ресурс]. – URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Torii>
4. Пагода Сэйганто-дзи [Электронный ресурс]. – URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Seiganto-ji>
5. Андреева, Е.А. Художественная работа по дереву / Е.А. Андреева. – М.: Рипол Классик, 2007. – 384 с.
6. Абрамова, О.К. Разработка 3D-модели изделия «органайзер для украшений» / О.К. Абрамова, В.А. Родионов // Высокие технологии в машиностроении: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2023. – С. 3–5.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРУГЛОГО ФАСОННОГО РЕЗЦА В САПР КОМПАС-3D

Кротинов Н.Б., к.т.н., доцент

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

Приведена методика моделирования круглых фасонных резцов в САПР КОМПАС-3D. Рассмотрен графический способ коррекции профиля резца. Показаны его преимущества по сравнению с аналитическим.

Ключевые слова: круглый фасонный резец, графическое профилирование, методика построения 3D-модели

FEATURES OF MODELING A ROUND SHAPED CUTTER IN THE CAD SYSTEM KOMPAS-3D

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

The article presents a method for modeling round shaped cutters in the CAD system KOMPAS-3D. A graphical method for correcting the cutter profile is considered. Its advantages over the analytical method are shown.

Keywords: round shaped cutter, graphic profiling, 3D model construction technique

Увеличение производительности обработки и выпуска готовой продукции в короткие сроки, особенно востребованное в настоящее время, требует применения специального металлорежущего инструмента, к которому относятся и фасонные резцы (ФР). Фасонные резцы позволяют получить деталь сложного профиля, не используя при этом дорогостоящее оборудование в виде станков с числовым программным управлением, не требуют подготовки управляющих программ и длительной наладки. Обработка ФР производится на универсальном токарном станке рабочим невысокой квалификации с высоким качеством и производительностью. Безусловно, стоимость специальных инструментов заведомо выше универсальных; требует их проектирования и изготовления под конкретный профиль. Такой инструмент целесообразно использовать при серийности выпуска начиная от среднесерийного и выше. Однако при особенно сложном профиле специальный инструмент окупается и в мелкосерийном производстве.

Появление систем автоматизированного проектирования (САПР) типа NX, КОМПАС-3D, T-Flex и т. п. сильно упростило задачу разработки фасонного инструмента, снизило трудоёмкость и сроки и, таким образом, увеличило преимущества его применения. Однако, как и при решении любой сложной задачи, всегда присутствуют определённые нюансы. Знакомству с ними и посвящена данная статья.

С целью создания положительной геометрии режущего клина и снижения, таким образом, сил резания, износа, улучшения условий схода стружки фасонный резец затачивают под положительным передним углом γ , а положительный задний угол α получают путём смещения диаметральной плоскости резца $Pp - Pp$ выше диаметральной плоскости обрабатываемой детали $Pv - Pv$ на величину K (рис. 1). В результате профиль резца получается отличным от профиля детали. Для устранения возникающей при этом погрешности обработки производят коррекцию профиля резца относительно профиля детали (профилирование). Определить профиль можно двумя способами: графически и аналитически. Аналитический включает в себя решение большого количества тригонометрических уравнений, требует значительного

времени и позволяет получить координаты искомым узловых точек профиля резца с гарантированной точностью 0,001 мм [1, с. 97]. Графический способ проще и быстрее, однако до появления электронной вычислительной техники и определённого программного обеспечения он требовал вычерчивания профиля резца вручную в масштабе от 10:1 до 50:1 для получения требуемой точности [2, с. 9], сильно зависящей от человеческого фактора.

С появлением компьютерных программ поддержки конструкторских разработок (САМ или САПР) у инженеров появилась возможность не только получить требуемый профиль фасонного резца с необходимой точностью и производительностью, но также на его основе разработать 3D-модель. Покажем, как это выполнить практически.

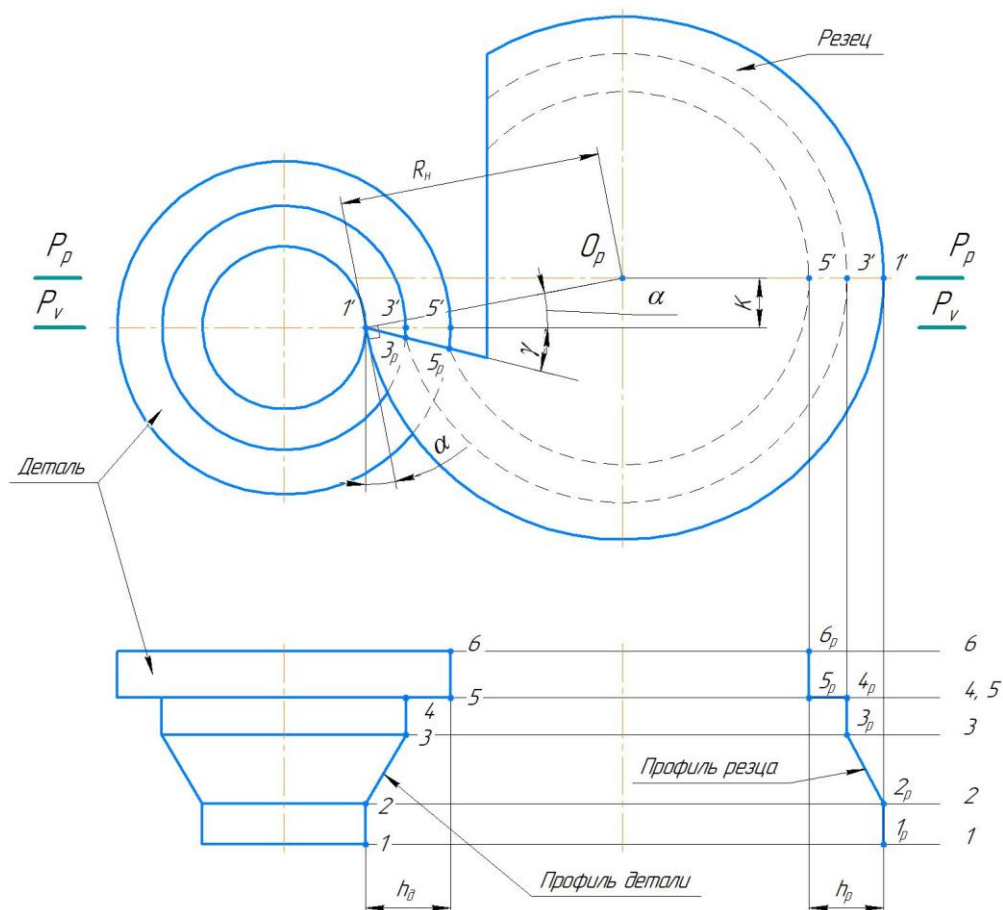


Рис. 1. Графическое профилирование круглого фасонного резца

В САПР КОМПАС-3D построим ортогональную (вид спереди) и горизонтальную (вид сверху) проекции обрабатываемой детали. Обозначим на горизонтальной проекции характерные (узловые) точки профиля детали цифрами 1, 2, 3... (см. рис. 1). Важно цифрой 1 обозначить точку, лежащую на самом маленьком диаметре обрабатываемой детали. Эта точка называется базовой. Порядок обозначения остальных точек не столь важен. Затем перенесём эти точки на диаметральную плоскость $P_v - P_v$ фронтальной проекции детали и обозначим их точками 1', 3', 5' (точки, лежащие на одном диаметре, нет смысла переносить все, достаточно перенести только одну из них, так как на виде спереди они будут совпадать). Из точки 1' необходимо провести два луча под углом γ и α к диаметральной плоскости детали $P_v - P_v$. Перенесём точки 3' и 5' на луч, расположенный под углом γ , в места пересечений луча с окружностями, на которых лежат эти точки, и обозначим их 3_p и 5_p. Из точки 1' на луче, проходящем под углом α , начертим отрезок тонкой линией размером $R_n = \frac{D_n}{2}$, на конце которого будет находиться центр резца O_p . Из центра резца (точка O_p) радиусом R_n прочертим окружность основной линией с осями – это будет наружный диаметр резца. Перенесём точку 1' на диаметральную плоскость резца $O_p - O_p$ и обозначим её 1'_p. Также из центра резца

штриховыми окружностями соответствующих диаметров перенесём точки 3_p и 5_p на диаметрально плоскость резца и обозначим их $3'_p$ и $5'_p$. Из точек $1'_p$, $3'_p$ и $5'_p$ опустим линии на горизонтальную проекцию до пересечения с такими же линиями, проведёнными из точек 1, 2, 3... профиля детали перпендикулярно её оси. Места пересечений обозначим точками 1_p , 2_p , 3_p , 4_p , 5_p и 6_p . Соединим точки 1_p , 2_p , 3_p , 4_p , 5_p и 6_p основными линиями между собой и получим, таким образом, профиль резца. Высота профиля резца h_p должна получиться меньше высоты профиля детали h_d . Завершим оформление схемы: добавим ось резца на горизонтальной проекции и режущий клин на фронтальной. Таким образом, этап профилирования выполнен. Перейдём ко второму этапу – построение 3D-модели круглого фасонного резца.

Скопируем профиль резца вместе с осью (рис. 2). Создадим «Деталь», «Эскиз», вставим скопированный профиль.

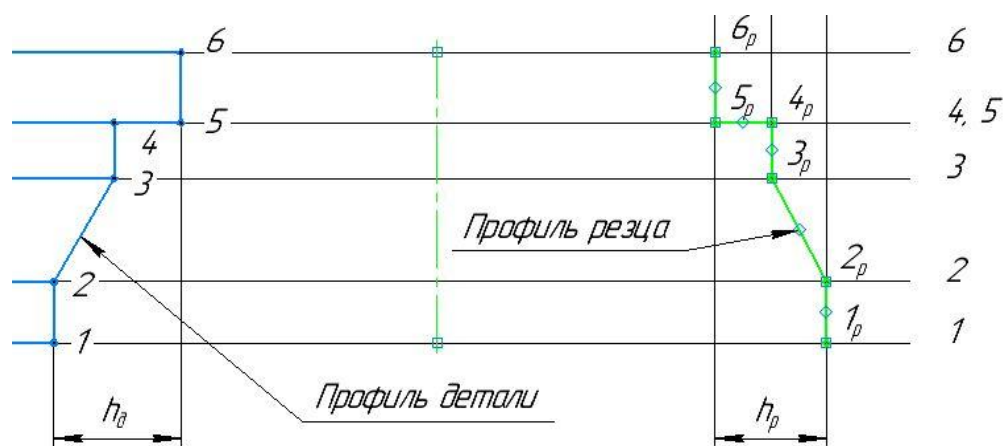


Рис. 2. Копирование профиля резца

Добавим с двух сторон профиля отрезки по 1,5 мм для перекрытия профиля детали, а также буртик и контур отверстия с двумя фасками (рис. 3) (размеры отверстия и буртика примем по табл. 3.4, 3.5 [3]). «Выйдем» из эскиза, создадим «Элемент вращения».

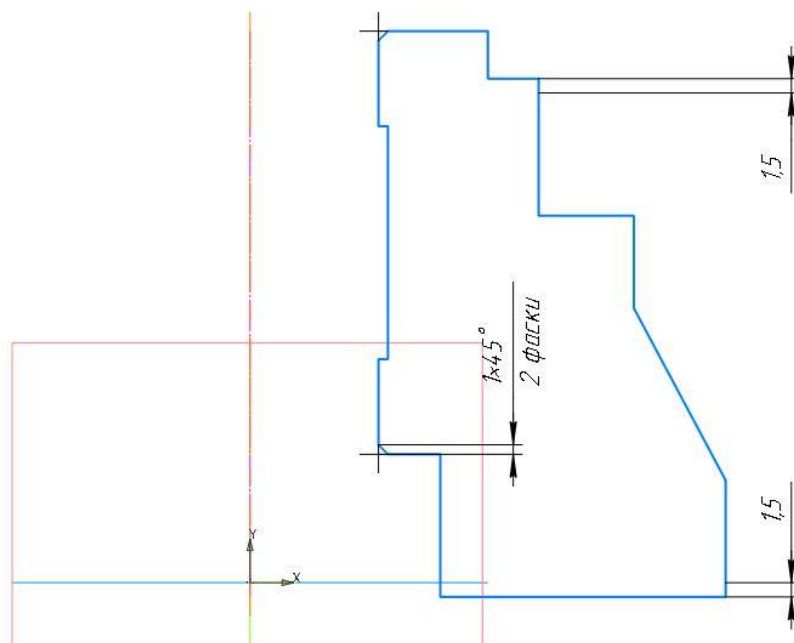


Рис. 3. Эскиз модели резца

Далее перейдём к построению зубчатого венца на поверхности буртика. Выполним для начала касательную плоскость к наружной цилиндрической поверхности буртика (рис. 4).

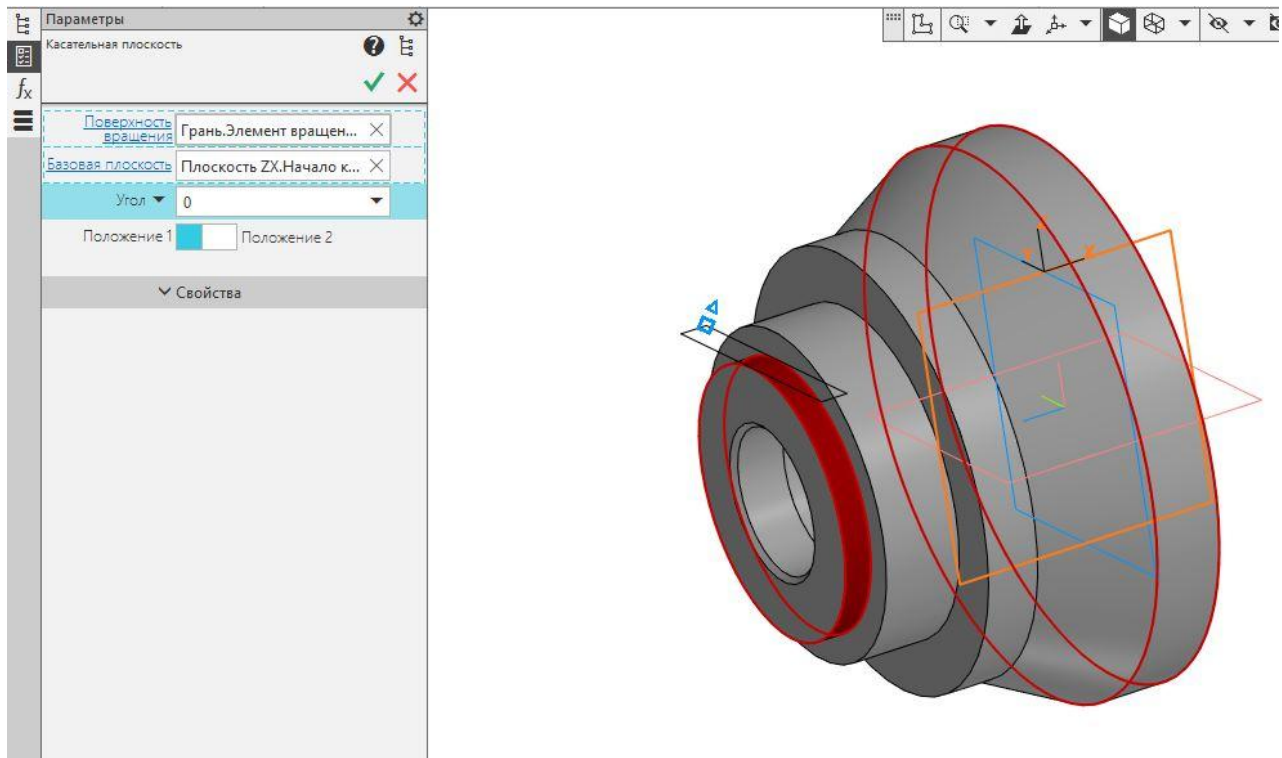


Рис. 4. Построение касательной плоскости

Затем создадим ось на пересечении двух плоскостей: касательной плоскости и торца резца (рис. 5).

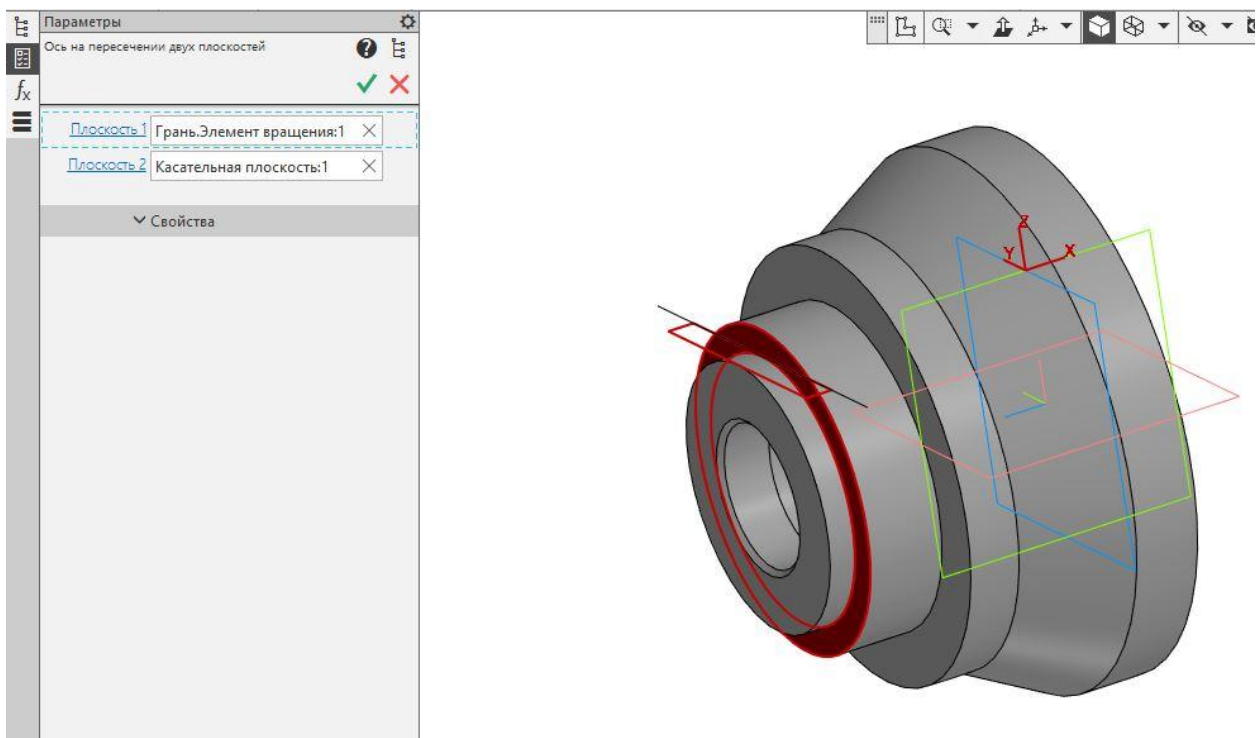


Рис. 5. Построение оси пересечения

Затем сделаем плоскость под углом $\mu = 5,28^\circ$ к касательной плоскости, указав ранее созданную ось (рис. 6). Угол μ определяется по формуле $\tan \mu = \frac{\pi}{z}$ в зависимости от числа зубчиков z .

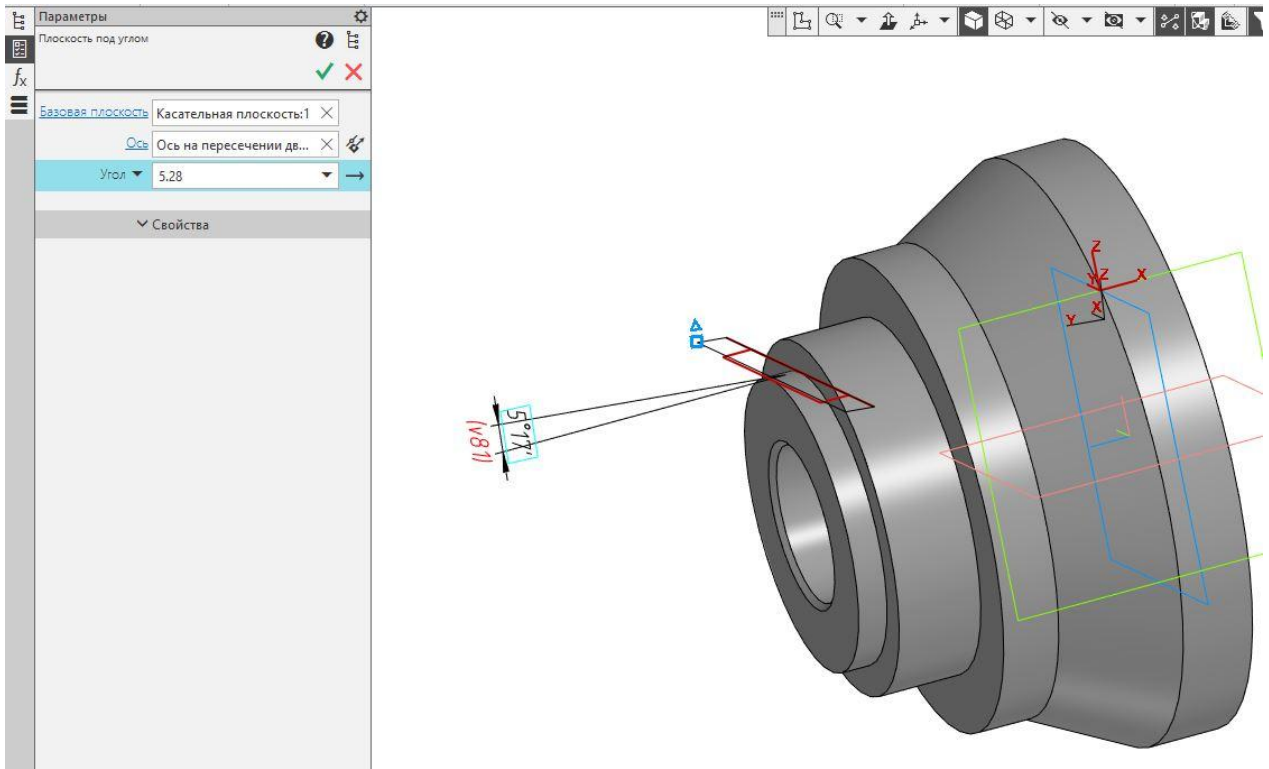


Рис. 6. Построение плоскости под углом

В созданной плоскости сделаем эскиз: равнобокую трапецию с основанием 0,5 мм, углами 45° , расположенную симметрично относительно оси детали на расстоянии l от уступа в зависимости от толщины буртика $l = l_6 - 1,75$ мм (рис. 7).

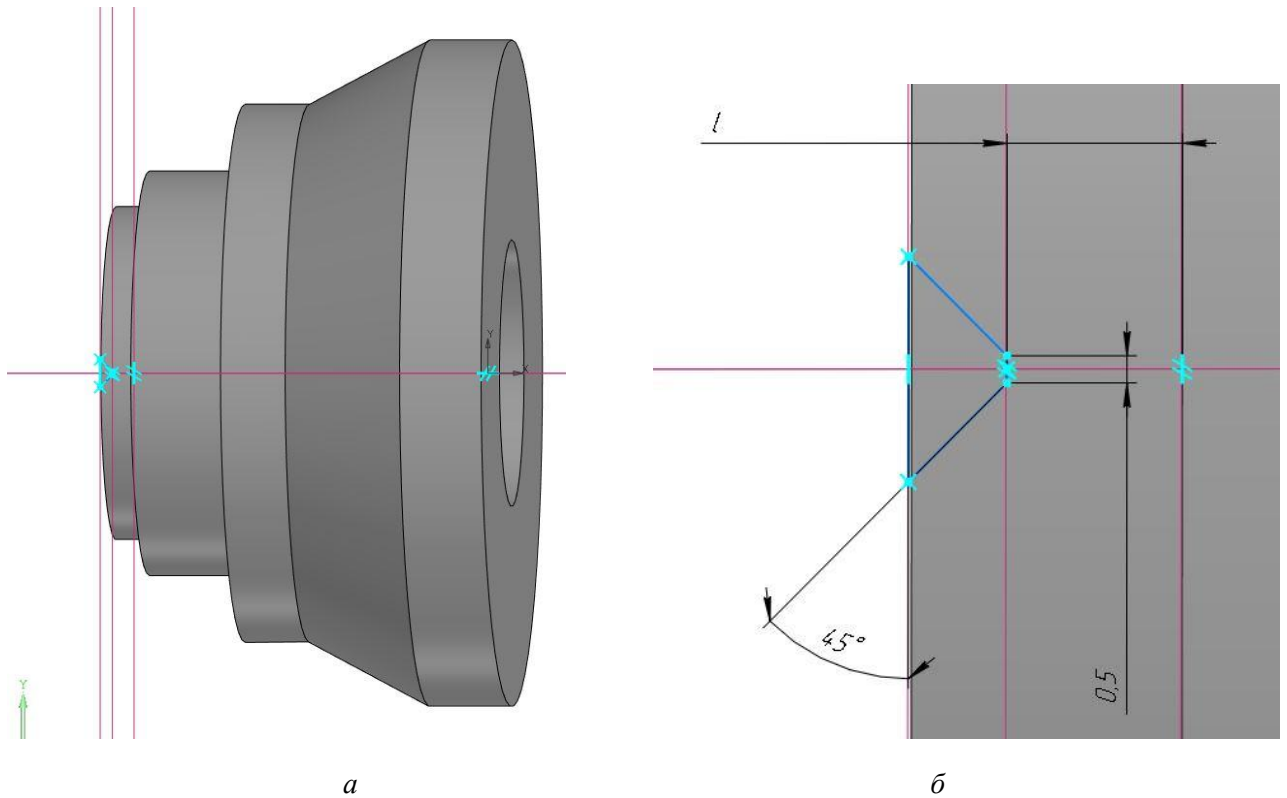


Рис. 7. Построение трапеции:
 а – расположение трапеции в общем виде;
 б – трапеция в увеличении

«Вырежем» выдавливанием полученную трапецию на расстояние, немного большее, чем толщина буртика (рис. 8).

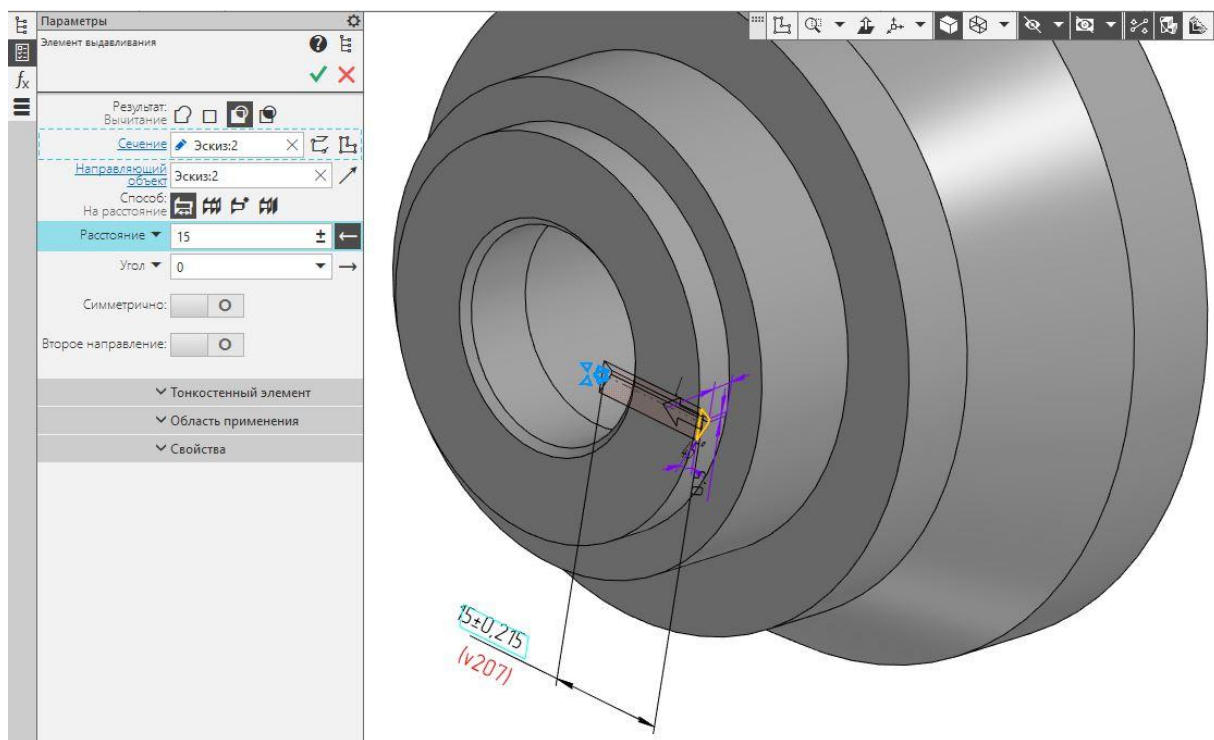


Рис. 8. Вырезание трапеции

Сделаем массив по концентрической сетке с углом 360° и количеством экземпляров (зубчиков) 34 шт. (рис. 9).

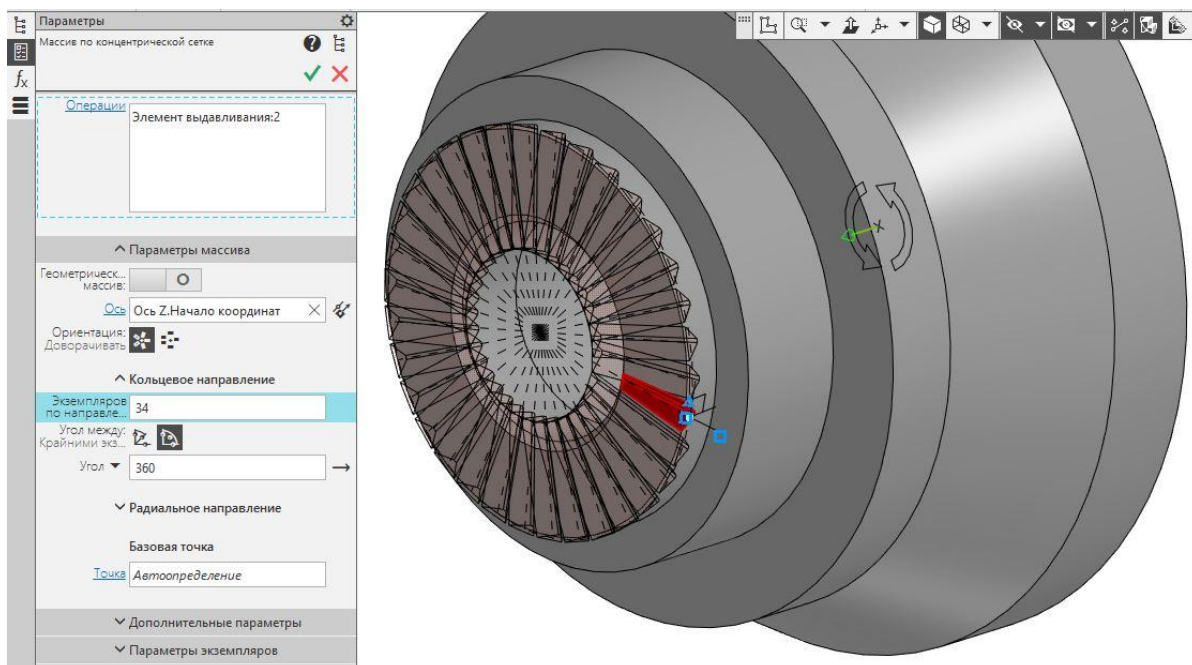


Рис. 9. Размножение зубчиков

Осталось выполнить стружечную канавку. Для этого создадим эскиз (рис. 10) по размерам табл. 3.4, 3.5 [3] и, вырезав «Через всё», получим окончательную 3D-модель реза (рис. 11).

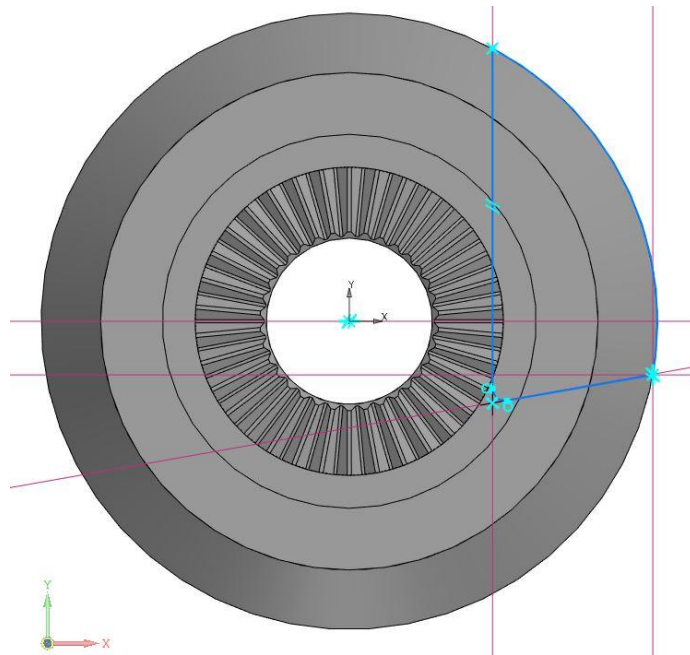


Рис. 10. Эскиз стружечной канавки

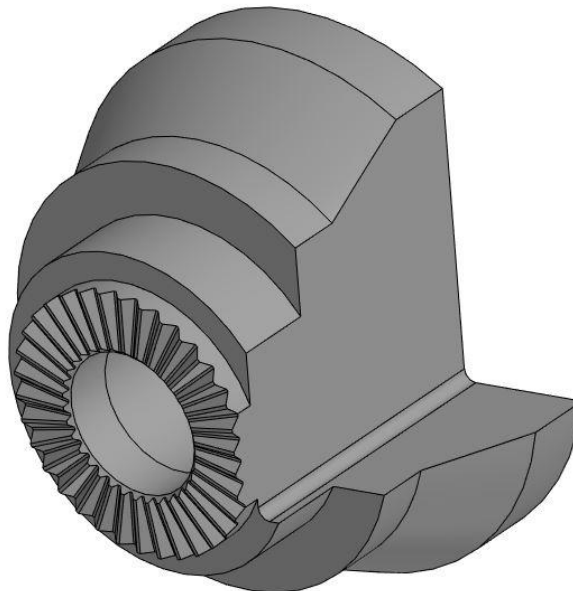



Рис. 11. 3D-модель резца

Выводы: использование графического способа получения профиля круглого фасонного резца значительно сокращает время проектирования по сравнению с аналитическим, при этом сохраняется требуемая точность размеров. Кроме того, графический способ позволяет использовать полученный профиль для 3D-моделирования резца.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование металлорежущего инструмента: учебник / Г.А. Мелетьев, А.Г. Схиртладзе, В.Е. Шебашев, Л.Н. Шобанов. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 388 с.
2. Папшева, Н.Д. Проектирование фасонных резцов: методические указания по выполнению курсовых, практических и контрольных работ / Н.Д. Папшева, О.М. Акушская. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. – 36 с.
3. Режущий инструмент. Курсовое и дипломное проектирование: учебное пособие / Под ред. Е.Э. Фельдштейна. – Минск: Дизайн ПРО, 2002. – 320 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОТЛИВОК ХУДОЖЕСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ


Никитин К.В. , д.т.н., профессор, **Константинов В.Н.**, инженер, аспирант, **Князев А.В.**, художник-скульптор высшей категории

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: kvn-6411@mail.ru*

Показаны основные технологические подходы по интеграции аддитивных и литейных технологий для получения отливок художественного назначения. Данное направление существенно сокращает сроки подготовки и расширяет возможности литейного производства. Наиболее рациональным является использование цифровых технологий для создания концептов будущих изделий, цифровых двойников литых элементов, а также изготовления моделей и модельных комплектов при литье по выплавляемым (выжигаемым) моделям и в формы из холодно-твердеющих смесей.

Ключевые слова: художественные отливки, аддитивные технологии, литье по выплавляемым моделям, литье в формы из холодно-твердеющих смесей

THE USE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF ARTISTIC CASTINGS

Nikitin K.V. , Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Konstantinov V.N.**, engineer, PhD student, **Knyazev A.V.**, artist-sculptor of the highest category

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: kvn-6411@mail.ru*

The main technological approaches for the integration of additive and casting technologies for the production of artistic castings are shown. This direction significantly reduces the preparation time and expands the possibilities of foundry production. It is most rational to use digital technologies to create concepts for future products, digital counterparts of cast elements, as well as for the manufacture of models and model kits when casting on smelted (burnt) models and into molds from cold-hardening mixtures.

Keywords: artistic castings, additive technologies, die casting, casting into molds from cold-hardening mixtures

Введение

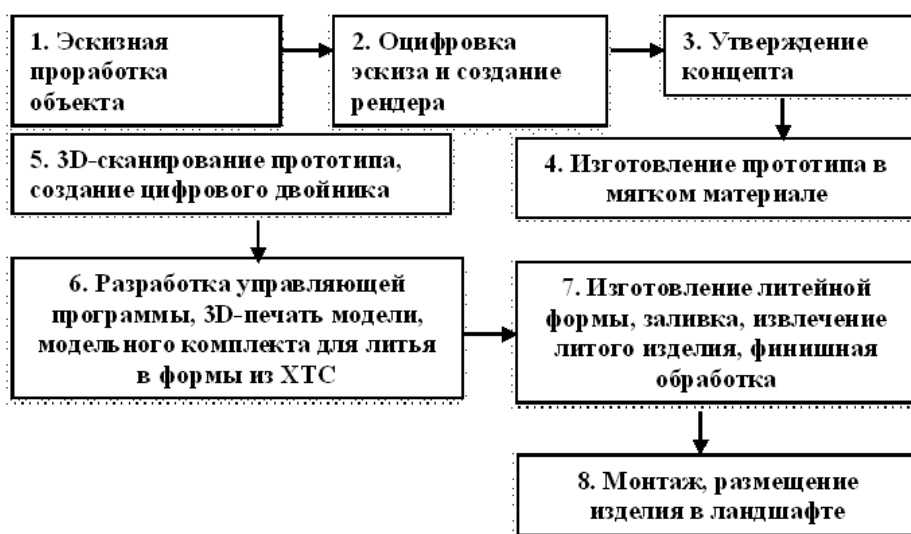
Изготовление литых изделий художественного назначения на протяжении многих веков и по настоящее время характеризует уровень технологического развития литейного производства [1–3]. Художественное литье находится на стыке искусства и производства, а технологии изготовления художественных отливок, объединяя в себе разнообразные технологические приемы и способы литья, характеризуются многообразием протекающих при этом физико-химических процессов на всех технологических этапах получения изделий. Таким образом, технологии получения отливок художественного назначения во многом аналогичны технологиям изготовления конструкционных отливок [4–7].

Художественные отливки, как и ряд конструкционных отливок, как правило, получают литьем в разовые формы по разовым или полупостоянным моделям. Основными способами литья художественных отливок по-прежнему являются литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) и литье в песчано-глинистые формы (ПГФ) или в формы из холодно-твердеющих смесей (ХТС). При наличии мелкого (ажурного) рельефа предпочтение отдается способу ЛВМ.

Сочетание традиционных и современных цифровых технологий на этапах подготовки производства позволяет существенно расширить возможности литейных технологий.

Результаты исследований. В Центре литейных технологий (ЦЛТ) Самарского политеха разработаны и внедрены несколько технологических подходов, объединивших цифровые и литейные технологии для создания художественных отливок экстерьерного (статуарного) вида, которые, как правило, располагаются в уличном ландшафте (рис. 1).

В случае отсутствия аутентичных аналогов для создания прототипа на первом этапе происходит эскизная проработка объекта (рис. 1, а). После оцифровки эскиза (этап 2) и утверждения концепта (этап 3) начинается изготовление прототипа в мягком материале, в качестве которого используют скульптурный пластилин или глину (этап 4). Далее с применением цифровых технологий (этапы 5, 6) создается цифровой двойник прототипа (электронно-геометрическая модель) и средствами аддитивного производства изготавливают модельный комплект для получения литого изделия. На завершающих этапах 7, 8 получают литое изделие и осуществляют монтаж и размещение объектов в ландшафте.



а



б

Рис. 1. Применение цифровых технологий для получения художественных отливок:

а – с использованием эскиза и прототипа в мягком материале;

б – с использованием аутентичных аналогов

Для усиления эффекта художественного восприятия и повышения степени детализации для создания прототипа иногда необходимо использовать аутентичные аналоги (рис. 1, б). В этом случае для получения электронно-геометрической модели прототипа осуществляют 3D-сканирование (реверс-инжиниринг) аутентичного аналога.

При подготовке производства литых элементов, например для стелы «Героям специальной военной операции», применяли комплексную технологию по оцифровке объектов, выполненных из мягкого материала и аутентичных аналогов. На рис. 2 представлен цифровой концепт стелы для утверждения. Композиция включает в себя бетонное основание из двух ступеней общей высотой 300 мм, облицованное гранитными плитами; гранитную стелу высотой 2000 мм, стилистически напоминающую фрагмент богатырского щита; на первой ступени располагаются аутентичная артиллерийская гильза противотанковой пушки МТ-12 «Рапира» и прорастающая сквозь нее литая роза, символизирующая победу жизни над войной; на второй ступени располагается литой боевой шлем штурмовика; на лицевой грани гранитной стелы размещены литые мемориальная таблица, буква «Z», стилизованная под георгиевскую развевающуюся на ветру ленту; по абрису лицевой грани гранитной стелы расположено 12 капсульных частей аутентичных крупнокалиберных гильз.



Рис. 2. Цифровой концепт стелы «Героям специальной военной операции»

Прототип буквы «Z» был выполнен в мягком материале и отсканирован. Далее средствами аддитивного производства была изготовлена модель для литья в форму из ХТС. Прототип розы также был изготовлен из мягкого материала. По нему выполнили силиконовую форму для получения восковой мастер-модели для литья по выплавляемым моделям. Для изготовления отливки «Шлем» был отсканирован аутентичный аналог. Средствами аддитивного производства изготовлена увеличенная с коэффициентом 1,2 модель отливки для литья в формы из ХТС. Все литые элементы были произведены из бронзы марки БрОЦС.

Торжественное открытие стелы состоялось 7 ноября 2024 года (рис. 3).



Рис. 3. Памятная стела «Героям специальной военной операции»

Таким образом, интеграция цифровых и литейных технологий позволяет существенно сократить сроки подготовки и расширить возможности литейного производства при изготовлении художественных отливок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рубцов, Н.Н. История литейного производства в СССР / Н.Н. Рубцов. – М.: Машиностроение, 1962. – 287 с.
2. О технологии художественного литья / Ф.Д. Оболенцев, Л.А. Иванова, В.И. Каркин, С.В. Попов // Литейное производство. – 1981. – № 3. – С. 38–39.
3. Зотов, Б.Н. Художественное литье / Б.Н. Зотов. – М.: Машиностроение, 1982. – 288 с.
4. Гуляев, Б.Б. Художественное литье в Санкт-Петербурге / Б.Б. Гуляев // Литейное производство. 1992. – № 6. – С. 35–37.
5. Магницкий, О.Н. Художественное литье / О.Н. Магницкий, В.Ю. Пиирайнен. – СПб.: Политехника, 1996. – 231 с.
6. Емельянов, В.О. Получение отливок с развитым рельефом для художественных изделий / В.О. Емельянов, А.А. Бречко // Литейное производство. – 2000. – № 1. – С. 25–27.
7. Магницкий, О.Н. Развитие художественного литья в России / О.Н. Магницкий, В.Ю. Пиирайнен // Литейное производство. – 2000. – № 1. – С. 35–37.

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ

Преображенский А.П., профессор, д.т.н., профессор, Никонорова Д.Д., студент

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: sallofisheruwu@mail.ru

Рассматриваются возможности управления процессами производства сложных технических объектов на предприятии. С учетом ограничений по различным ресурсам происходит формирование оптимизационной модели. Вследствие неопределенности цели формирования сложных объектов необходимо использовать трудность ее достижения. Применяется интегральный подход, учитывающий множество показателей, с привлечением совокупности экспертов.

Ключевые слова: предприятие, управление, оптимизация, экспертный подход

COMBINED APPROACH TO MANAGING PRODUCTION PROCESSES AT THE ENTERPRISE

Preobrazhensky A.P., Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Nikonorova D.D., student

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation
E-mail: sallofisheruwu@mail.ru

The paper discusses the possibilities of managing the production processes of complex technical objects at the enterprise. Taking into account the constraints on various resources, an optimization model is formed. Due to the uncertainty of the purpose of the formation of complex objects, it is necessary to use the difficulty of achieving it. An integral approach is used, taking into account a variety of indicators, with the involvement of a set of experts.

Keywords: enterprise, management, optimization, expert approach

При анализе производственных процессов внутри промышленной организации необходимо учитывать множество значимых факторов [1]. На предприятии создаются сложные технические объекты. Требуется осуществлять процессы управления по формированию таких объектов. Предлагается опираться на комбинированный подход, в который входят оптимизационные методы и совокупный учет мнений экспертов. Есть определенные ограничения по различным ресурсам. Основываясь на них, можно сформировать оптимизационную модель:

$$\sum_{j=1}^n r_j z_j x_j \rightarrow \max, \sum_{j=1}^n a_{ji} z_j x_j \leq A_i, i = \overline{1, I},$$

$$\sum_{j=1}^n q_{jf} z_j x_j \leq Q_f, f = \overline{1, F}, \sum_{j=1}^n q_{jf} z_j x_j \leq Q_f, f = \overline{1, F}, \quad (1)$$

$$x_j \geq x_j^{dop}, j = \overline{1, n}, z_j = \begin{cases} 1, & j = \overline{1, n}, \\ 0, & \end{cases}$$

здесь r_j – удельный ресурс, требующийся для операции j -го типа; x – число операций j -го типа z_i – булева переменная, она равна 1, если j -й тип операции применяется в течение заданного времени, и будет равна 0 в противном случае, a_{ji} – коэффициент использования

j -го материального ресурса для соответствующей операции; A_i – объемы готовящихся i -х материальных ресурсов; q_{ji} – коэффициент связи между производственным ресурсом f -го типа с операцией j -го типа; Q_f – объемы готовящихся производственных ресурсов f -го типа.

В ходе формирования сложных технических объектов цель не всегда обозначена определенным образом. Кроме того, в ходе принятия решений не во всех случаях есть требуемая информация. То есть, требуется ориентироваться на некоторый интегральный показатель, позволяющий учесть различные варианты в ходе анализа производственных процессов. Чтобы осуществлять его оценку, предлагается опираться на комбинированный подход, который может быть использован в ходе цифрового управления. При описании трудности достижения цели в производственном процессе предлагается использовать соответствующие определения [2]. Пусть рассматривается показатель j , который соотносится со шкалой $(0,1)$. Его требуется оценить при помощи значения $0 \leq \mu_j \leq 1$ с учетом того, что эксперт в производственном процессе применяет значение, связанное с определенным порогом $0 \leq \varepsilon_j \leq 1$. Чтобы описать меру того, насколько решение будет иметь определенные вариации в рамках j -го показателя, необходимо ориентироваться на значение трудности, при котором будет обеспечен требуемый уровень:

$$d_j = \frac{\varepsilon_j(1 - \mu_j)}{\mu_j(1 - \varepsilon_j)}. \quad (2)$$

В ходе рассмотрения множества показателей $j = \overline{1, J}$ соответствующая трудность связана с интегральным эффектом. Это ведет к тому, что интегральный показатель будет таким:

$$D = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - d_j), \quad (3)$$

Процедура ранжирования производственных решений будет связана с ним. На основе цифровых технологий можно учесть совокупное мнение экспертов. Они могут в ходе своей работы опираться на предварительным образом сформированную библиотеку решений, которые связаны с ключевыми особенностями производства сложных технических объектов. Предлагается в ходе работы совокупной группы экспертов ориентироваться на такие шаги.

Шаг 1. При обращении к библиотеке каждый эксперт делает выбор некоторых производственных решений, которые могут быть нереализуемыми, а также ошибочными, Их число $n \leq 9$. С точки зрения улучшения производственного процесса они должны быть согласованы с другими экспертами. Решения в дальнейшем при необходимости могут быть изменены.

Шаг 2. Делается выбор некоторого эксперта. Он должен провести анализ относительно сформированного подмножества среди тех решений, которые были выбраны. Перед тем как он выдаст результаты, до него доводятся ключевые показатели. Важно, чтобы были обеспечены процессы экспертного ранжирования как для полученных решений, так и по совокупности анализируемых показателей. Для этого предусмотрено множество вопросов, которые будут предъявляться эксперту. Например, они могут быть такими: «С учетом какого из показателей будет делаться выбор необходимого решения?», «Какое из решений вы рассматриваете как предпочтительное?», «Что в таком решении вы можете особо выделить?». Осуществляется выделение такого решения, которое является самым влиятельным.

Шаг 3. Эксперты участвуют в процессе оценки производственных решений $\mu_{ji}, \varepsilon_{ji}$, $i = \overline{1, I}$. При этом решения соответствующим образом нумеруются. Вся совокупность решений предлагается каждому из экспертов. Эта совокупность будет ими размещена внутри шкалы $(0,1)$. После того как все эксперты провели анализ, для их группы будет сформировано

среднее значение $\mu_{ji}, i = \overline{1, I}$. Затем необходимо найти среднее значение ε_{ji} . С этой целью перед всеми экспертами группы ставится вопрос: «Где в анализируемой шкале требуется поместить оценку производственного решения, рассматриваемого как «идеальное»?»

Шаг 4. Осуществляется повтор по шагу 2 и шагу 3, пока не будут перебраны все эксперты в рассматриваемой группе. Поскольку предпочтения каждого из экспертов являются индивидуальными, созданные решения будут достаточно разнообразными.

Тогда с учетом действий всей группы экспертов можно осуществить расчет значений d_{ji} , которые соответствуют любому из решений [3]. В итоге проводится расчет интегрального показателя D . Последние расчеты служат основой для обоснованного ранжирования решений. Подход, связанный с голосованием, предоставляет возможность для того, чтобы результаты группы экспертов были верифицированы. Пусть производственные решения α и β связаны с парой некоторых показателей. Будем считать, что α характеризуется для второго показателя более высокой оценкой, а для β более высокая оценка будет по первому показателю. Эксперты, которые входят в рассматриваемую группу, должны определить выбор по решениям с привлечением метода голосования. Например, будет определено решение α с учетом принятия во внимание первого показателя. Затем процесс голосования повторяется, причем по α будет уменьшаться значение оценки. Голосование прекращается, когда группа экспертов придет к решению β . Далее будет рассматриваться пара «второй и третий показатель», «третий и четвертый показатель» с привлечением такого же процесса голосования. В итоге будет получено некоторое множество производственных решений. В дальнейшем оно может быть упорядочено с точки зрения необходимости использования решений в определенной ситуации. Каждому из показателей может быть поставлено в соответствие некоторое предпочтение α_j . Это позволяет по упорядоченному множеству решений дать характеристику его устойчивости. Учитывается условие нормировки

$$0 \leq \alpha_j \leq 1, \sum_{j=1}^J \alpha_j = 1. \quad (4)$$

Формирование интегрального критерия осуществляется с учетом коэффициентов α_j , при этом можно говорить об устойчивости результатов работы группы экспертов в том случае, если не будет изменения в ранжировании. Иначе необходимо, чтобы работа группы экспертов была проведена ещё раз.

Привлечение группы экспертов позволит осуществлять согласование различных предположений специалистов, в том числе и противоречивых. Будет проведен выбор верификационного и обоснованного варианта, базирующегося на применении цифровых технологий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Садыков, В.О. Анализ и моделирование производственных процессов для оптимизации систем управления / В.О. Садыков, М.А. Сафин // Аллея науки. – 2024. – Т. 1, № 5 (92). – С. 30–33.
2. Берколайко, М.З. Трудности в смысле И.Б. Руссмана и оценка надежности управления / М.З. Берколайко, Ю.В. Долгих, К.Г. Иванова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2008. – № 2. – С. 5–9.
3. Харченко, Е.А. Морфологический подход к принятию обоснованных решений по экспертным суждениям / Е.А. Харченко // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. – 2019. – № 2. – С. 42–56.

ПРИМЕНЕНИЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА FLUENT EDITOR ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТАКСОНОМИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ В САПР КОМПАС-3D

Свирень А.И.¹, преподаватель, **Черепашков А.А.**², д.т.н., доцент,
Черноусова А.М.³, к.т.н., доцент

¹ МБОУ школа № 68 г.о. Самара, г. Самара, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

³ Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

E-mail: aleksandra-sviren@yandex.ru

Рассмотрены возможности применения онтологического редактора Fluent Editor при создании таксономии пользовательского интерфейса 3D-моделирования в САПР КОМПАС-3D. Приведены результаты онтологического анализа предметной области CAD-технологий применительно к задачам обучения пользовательского персонала машиностроительных САПР.

Ключевые слова: онтологический анализ, САПР, CAD-технологии, обучение персонала

USING THE FLUENT EDITOR ONTOLOGY EDITOR TO CREATE A TAXONOMY OF A 3D MODELING USER INTERFACE IN CAD SYSTEM KOMPAS-3D

Sviren A.I.¹, teacher, **Cherepashkov A.A.**², Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Chernousova A.M.³, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

¹ School 68, Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

³ Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

E-mail: aleksandra-sviren@yandex.ru

The possibilities of using the ontological editor Fluent Editor when creating a taxonomy of the user interface for 3D modeling in the CAD KOMPAS-3D are considered. The results of an ontological analysis of the subject area of CAD technologies are presented in relation to the tasks of training user personnel in mechanical engineering CAD systems.

Keywords: ontological analysis, CAD technologies, personnel training

Практически все современные систем автоматизированного проектирования (САПР), нашедшие практическое применение в машиностроении, являются геометрически и в обязательном порядке содержат подсистемы геометрического моделирования (САД-системы). Однако для внедрения и эффективного использования САД-технологий на предприятиях и в проектных организациях необходима главная составляющая САПР – целевой персонал – пользователи, как обладающие фундаментальными инженерными знаниями, включая традиционную инженерную графику, так и профессионально владеющими цифровыми методами и средствами автоматизации проектных работ.

САД-подсистема машиностроительной САПР обеспечивает комплексную автоматизацию проектно-конструкторских работ, включая трехмерное геометрическое моделирование деталей и сборочных единиц, а также получение ассоциативного к 3D-моделям пакета конструкторской документации – различного вида чертежей, спецификаций и пр. То есть квалифицированный пользователь САД должен обладать достаточно широким набором знаний и навыков для организации и исполнения многочисленных и разнообразных процессов проектной деятельности в среде автоматизированной системы.

Первоначально онтология развивалась как философское направление, изучающее фундаментальные принципы бытия, его наиболее общие сущности и категории, а также структуру и закономерности процессов познания, что позже нашло практическое применение в информационных приложениях. В настоящее время онтологические редакторы достаточно активно начинают использоваться для систематизации больших данных и автоматизации процесса формализации знаний в различных областях науки.

Применение онтологического анализа позволяет обоснованно выделить, формализовать и описать (на определенном графоаналитическом языке) процедурно-технологические составляющие компетенций пользователей компьютерных систем. При этом должны быть выделены связи и определена иерархия терминов и понятий, составляющих предметную область заданной профессиональной деятельности.

По определению, САПР обладают системными свойствами модульности и иерархичности. Прежде всего, иерархия уровней проектирования отражается в структуре прикладного программного обеспечения в виде иерархии подсистем. В интерактивных компьютерных приложениях морфология и иерархические связи компонент достаточно явно могут проявляться в формах и приёмах пользовательских интерфейсов.

Для решения поставленных в исследовании образовательных задач можно ввести определение, согласно которому онтология пользовательского интерфейса САПР – это иерархически структурированное множество терминов, представленных в интерактивных формах и диалогах всех типов. Эти термины и составляют предметную область обучения процедурно-технологическим компонентам компетенций целевого персонала САПР. Для облегчения практического использования онтология САПР может быть представлена в форме тезаурусов (табл. 1) и таксономий (табл. 2). В онтологических редакторах таксономии кодируются с помощью специальных языков и визуализируются в графическом виде, как правило, в форме ориентированного графа (рис. 1).

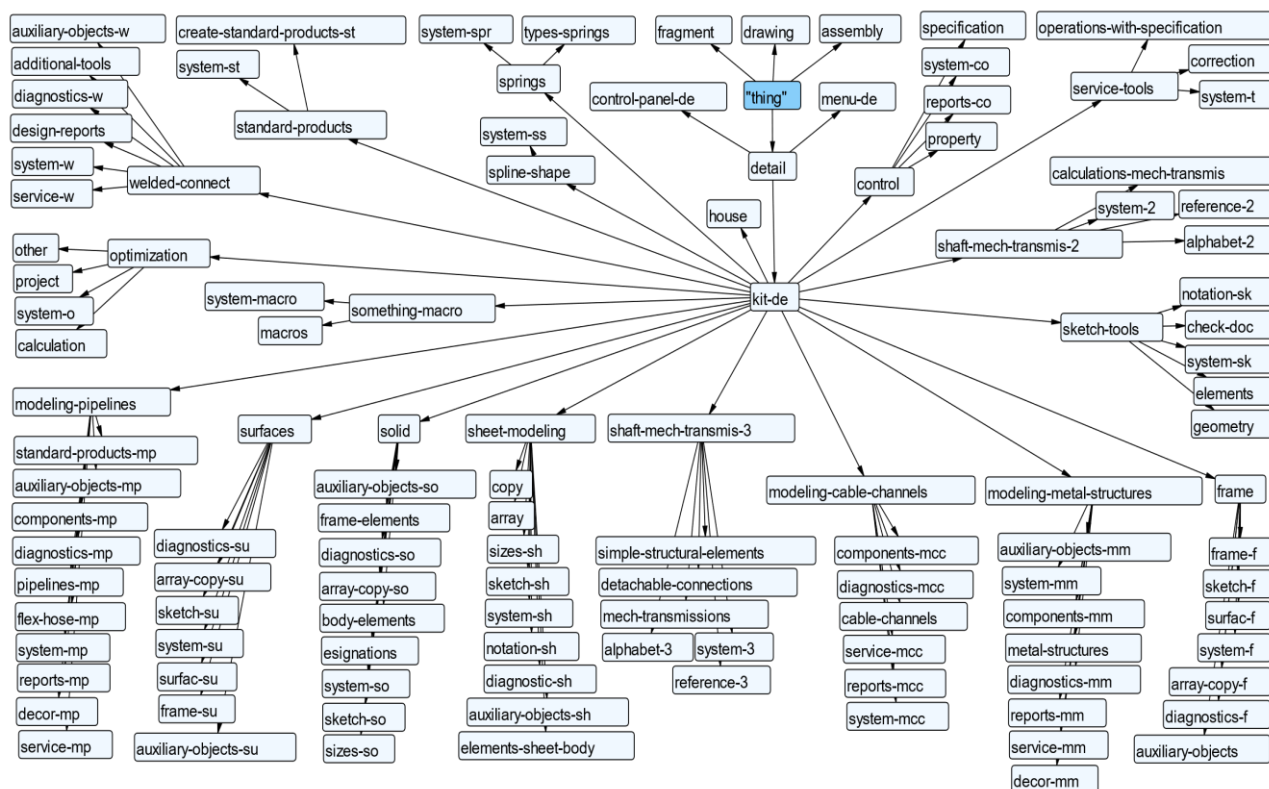


Рис. 1. Граф класса «Деталь-kit САПР КОМПАС-3D»

В разработанном тезаурусе пользовательского интерфейса САД-системы упорядочены используемые в проектной работе операции (команды) и их параметры, дано соответствие названию операции в КОМПАС-3D.

Фрагмент тезауруса класса «Деталь-kit» САД-системы КОМПАС-3D

| Наименование термина в таксономии | Название подкласса в нотации КОМПАС |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| system-sk | Системная |
| elements | Элементы |
| geometry | Геометрия |
| notation-sk | Обозначения |
| check-doc | Проверка документа |

Для систематизации выделенных в тезаурусе сущностей создается таксономия, описывающая иерархию терминов (команд интерфейса). При этом осуществляется разбиение терминологии на классы и установление связей между ними и фраза командного языка, записанная в нотации Fluent Editor [1].

Для онтологического инжиниринга применяется ряд приложений: Apollo, IsaViz, OilEd, OWLGrEd, Protégé [2] и Fluent Editor, который использовался в данной работе.

Открытый редактор Fluent Editor обладает расширенными возможностями в области анализа, а бесплатная версия доступна для выполнения научных исследований и работ.

Редактор позволяет автоматизировать декомпозицию сущностей предметной области и установить связи между ними как в программном, так и графическом виде. В результате можно выделить пути решения проектных задач, а также предложить алгоритмы оптимизации траектории индивидуальной подготовки и тренажа для разных категорий персонала.

Таблица 2

Фрагмент таксономии класса «Деталь-kit» САПР КОМПАС-3D

| Подкласс | Фраза определения (создания) экземпляра в подклассе | Операции (команды) КОМПАС, входящие в подкласс |
|-------------|---|---|
| system-sk | Every system-sk is a sketch-tools. | Создать, открыть, сохранить, сохранить как, печать, предварительный просмотр |
| elements | Every elements is a sketch-tools. | Элемент выдавливания, вырезать выдавливанием, ребро жесткости, сечение, разрезать |
| geometry | Every geometry is a sketch-tools. | Автолиния, окружность, прямоугольник, дуга, отрезок, вспомогательная прямая, точка, сплайн по точкам, коническая кривая, спроецировать объект, эллипс |
| notation-sk | Every notation-sk is a sketch-tools. | Автоосевая, надпись |
| check-doc | Every check-doc is a sketch-tools. | Проверка: наложения элементов, связей обозначений позиций, размеров |

Текст таксономии может составляться на специальном алгоритмическом языке, построчно, по определенным правилам синтаксиса, как это показано на рис. 2.

Comment: 'операции подкласса Инструменты эскиза для класса Деталь'.

Every system-sk is a sketch-tools.
 Every elements is a sketch-tools.
 Every geometry is a sketch-tools.
 Every notation-sk is a sketch-tools.
 Every check-doc is a sketch-tools.

Рис. 2. Пример программной формы представления таксономии в программе Fluent Editor

Бесплатная версия редактора ограничена написанием 220 строк в одном графе. Этого количества недостаточно для серьезного исследования, поэтому было предложено разделить

общую таксономию на группы классов. В первый уровень вошли основные «документы» (в соответствии с терминологией, принятой разработчиками КОМПАС [3]) – классы, отражающие основные режимы проектной деятельности пользователей САД-системы: «Деталь», «Сборка», «Чертеж» и «Фрагмент» и пр. Каждый из них, в свою очередь, был разделен на подклассы: menu, kit, control-panel и пр.

Экземплярами сущностей в подклассах выступает множество операций (команд интерфейса), каждая из которых может содержать в себе дополнительные свойства (в том числе и параметры операций).

В результате экспериментального онтологического исследования четырех классов: «Деталь», «Сборка», «Чертеж» и «Фрагмент» было сформировано 9 графов: Общий (для всех 4 классов), Деталь-menu, Деталь-kit, Сборка-menu, Сборка-kit, Чертеж-menu, Чертеж-kit, Фрагмент-menu, Фрагмент-kit.

Более подробно был описан класс «Деталь», поскольку именно в нем содержатся наиболее востребованные пользователями сущности функционала САД-операции объёмного моделирования, параметризации и формирования проекционные чертежей.

Класс «Деталь», таким образом, оказался самым функционально емким классом САПР КОМПАС-3D, требуемым для реализации задач обучения навыкам инженерной графики.

К моменту написания данной статьи разработана экспериментальная таксономия, включающая 1645 элементов, из которых к классу «Деталь» относятся 392 элемента [4]. Можно утверждать, что разработанные таксономии составляют самое полное онтологическое описание интерфейсов КОМПАС-3D.

Для целенаправленного обучения работы в САД-системах могут быть подобраны комплексы учебных проектных заданий (учебные проекты и упражнения), в свою очередь, прошедшие определенный классификационный отбор. При этом в качестве первичной онтологии могут быть использованы рабочие программы «фирменных» учебных курсов и сертификационных тестов компании «АСКОН» (разработчика КОМПАС-3D) для уровня М2 «Трёхмерное моделирование и разработка проектной документации».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Онтологический редактор Fluent Editor [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cognitum.eu/semantics/fluenteditor/> (дата обращения: 15.02.2025).
2. Онтологический редактор Protégé [Электронный ресурс]. – URL: https://protege.stanford.edu/download/protege/3.4/installanywhere/Web_Installers/ (дата обращения: 15.02.2025).
3. ООО АСКОН, КОМПАС-3D, Учебная версия [Электронный ресурс]. – URL: <https://edu.ascon.ru/main/download/freeware/> (дата обращения: 15.02.2025).
4. Черепашков, А.А. Применение онтологического анализа для оценки функционала САД-системы / А.А. Черепашков, А.И. Свирень // Школа-семинар молодых ученых и специалистов в области компьютерной интеграции производства. – Оренбург, 2024. – С. 243–246.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ 3D-ПРИНТЕРА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

Сулейманова Ф.Д.¹, студент, Захаров О.В.², профессор, д.т.н., профессор

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
г. Саратов, Российская Федерация

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: o.zakharov@stankin.ru

3D-принтеры с параллельной кинематикой типа «дельта» имеют сравнительно большие погрешности позиционирования. Это в настоящее время ограничивает их применение в промышленности. Однако механизм возникновения и компенсации погрешностей недостаточно изучен. В настоящей статье представлены результаты моделирования погрешностей позиционирования, полученные решениями прямой и обратной кинематики. Установлено, что погрешности имеют пространственный нелинейный характер.

Ключевые слова: аддитивное производство, 3D-принтер, параллельная кинематика, погрешность позиционирования

ANALYSIS OF THE POSITIONING ERROR OF A 3D PRINTER WITH PARALLEL KINEMATICS

Suleymanova F.D.¹, student, Zakharov O.V.², Professor, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

¹ Saratov Chernyshevsky State University, Saratov, Russian Federation

² Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russian Federation
E-mail: o.zakharov@stankin.ru

3D printers with parallel kinematics of the delta type have relatively large positioning errors. This currently limits their use in industry. However, the mechanism of occurrence and compensation of errors has not been sufficiently studied. This article presents the results of modeling positioning errors obtained by direct and reverse kinematics solutions. It is established that the errors have a spatial nonlinear character.

Keywords: additive manufacturing, 3D printer, parallel kinematics, positioning error

Механизмы параллельной кинематики эффективно применяются в различных областях машино- и приборостроения [1–3]. Кинематическая схема «дельта» относится к механизмам типа триподов и имеет три линейные степени свободы. Известным достоинством дельта-кинематики является высокая скорость перемещения конечного эффектора. Поэтому параллельная кинематика «дельта» применяется для 3D-принтеров, в основном типа FDM.

3D-принтеры с кинематикой «дельта» получили ограниченное применение. Это объясняется сравнительно низкой точностью. Применение недорогих комплектующих и некачественная сборка приводят к значительным погрешностям позиционирования. Анализ механизма возникновения погрешностей позиционирования конечного эффектора позволяет, с одной стороны, оценить влияние внешних и внутренних факторов на погрешность, с другой стороны, предложить эффективную методику компенсации этих погрешностей. Вопрос анализа погрешностей уже поднимался в статьях [4, 5]. В них были оценены абсолютные величины погрешностей позиционирования в зависимости от двух факторов: погрешности длины звеньев и погрешности шагового двигателя.

Решение задач прямой и обратной кинематики может выполняться с применением общих подходов на основе векторно-матричных преобразований или конформной геометрии [3, 6]. Однако в случае кинематики «дельта» возможно более простое решение с помощью геометрических соотношений. Решение обратной задачи дает простое выражение, а решение прямой задачи сводится к квадратному уравнению. Получаемые выражения изложены в ряде работ для дельта-роботов [7] и в наших работах для принтеров «дельта» [8].

Методика моделирования погрешностей позиционирования состояла в следующем. Задавались декартовы координаты точек (траектории) перемещения экструдера. Затем определялись перемещения рычагов по штангам на основе обратной кинематики. Решалась прямая кинематика с рычагами, имеющими различные длины, и определялись декартовы координаты экструдера. В итоге рассчитывалась погрешность позиционирования как разность декартовых координат. В качестве примера выполнено моделирование погрешностей позиционирования для следующих параметров 3D-принтера: радиус основания 200 мм, радиус платформы экструдера 25 мм, высота штанг 400 мм, длина рычагов 200 мм. Для анализа погрешностей длина одной или двух штанг принята равной 201 мм. Результаты моделирования показаны на рис. 1. В качестве исходных координат были взяты 21 точка, расположенные в одной плоскости на высоте 70 мм по окружностям с равномерными углами. На рис. 1 погрешности показаны с 10-кратным увеличением. Рис. 1, *а* иллюстрирует случай, когда один рычаг имеет большую длину, а рис. 1, *б* – когда два рычага имеют увеличенную длину.

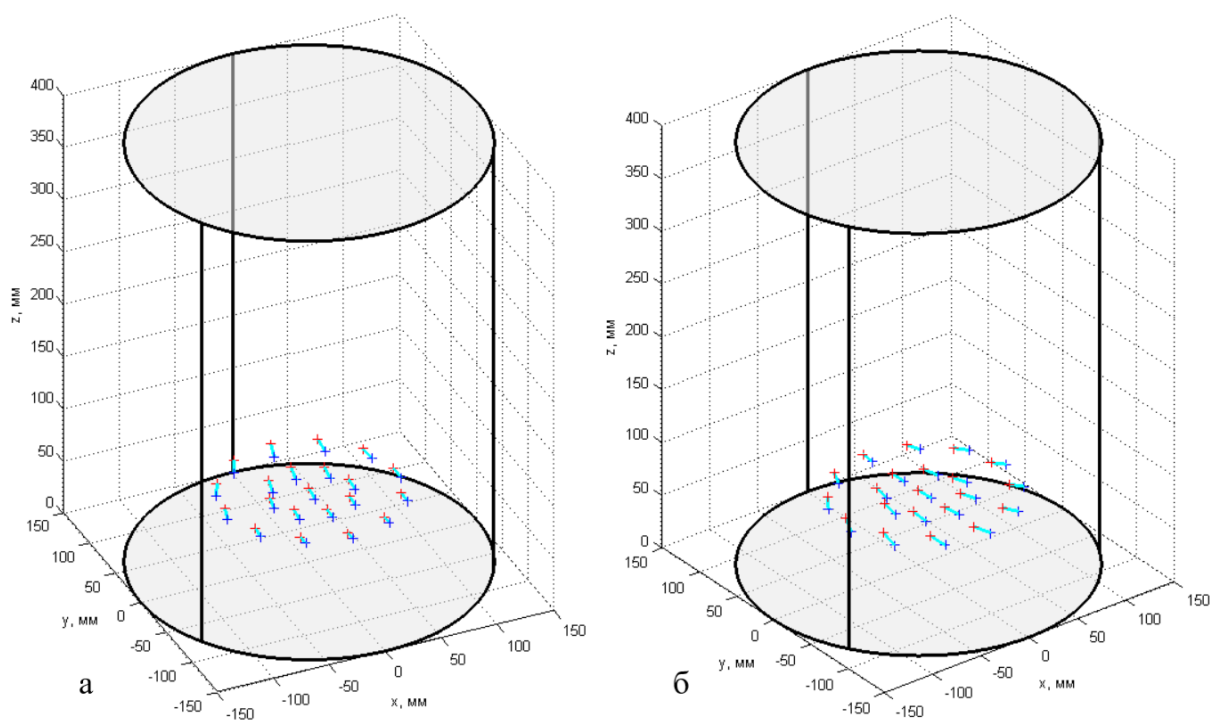


Рис. 1. Погрешности позиционирования в зависимости от погрешности рычага:
а – один рычаг, *б* – два рычага

На рис. 2 показаны проекции погрешности позиционирования на оси декартовой системы координат для случая рис. 1, *а*. Видно, что величины погрешностей отличаются как для проекций на оси координат, так и для отдельных точек траектории экструдера. Погрешности не лежат в одной плоскости, поэтому не могут быть компенсированы простым нивелированием стола.

Основной вывод проведенных исследований заключается в установлении пространственного нелинейного характера погрешностей позиционирования в зависимости от погрешности длины рычагов. Компенсация таких погрешностей требует разработки новой методики коррекции погрешностей. Это станет предметом дальнейших исследований.

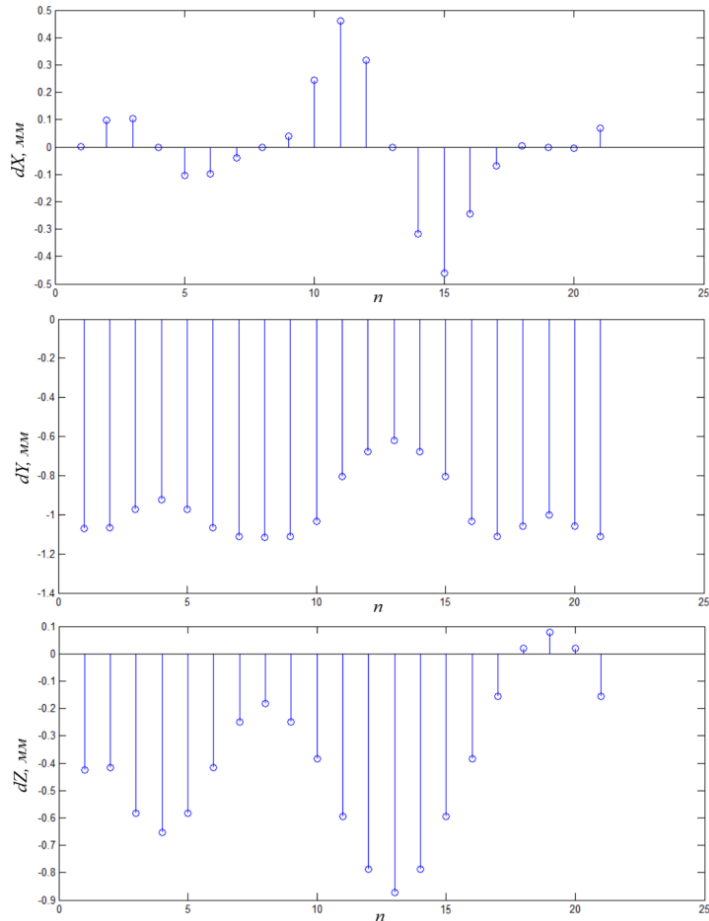


Рис. 2. Погрешности позиционирования по осям декартовой системы координат

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ганиев, Р.Ф. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике / Р.Ф. Ганиев, В.А. Глазунов // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 459, № 4. – С. 428.
2. Трошин, А.А. Обзор технологических возможностей FDM 3D-принтеров / А.А. Трошин, О.В. Захаров // Современные материалы, техника и технологии. – 2020. – № 1 (28). – С. 61–65.
3. Антонов, А.В. Кинематический анализ нового пятиподвижного робота параллельной структуры типа «Дельта» / А.В. Антонов, П.А. Ларюшкин, А.С. Фомин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2024. – № 4. – С. 135–149.
4. Kinematic error modeling of delta 3d printer / A.V. Kochetkov, T.N. Ivanova, L.V. Seliverstova, O.V. Zakharov // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – Pp. 77–83.
5. Захаров, О.В. Анализ погрешностей 3D-принтера со схемой «дельта» / О.В. Захаров, Ф.Д. Сулейманова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2023. – Т. 10, № 1–2. – С. 57–62.
6. Колтыгин, Д.С. Аналитический и численный методы решения обратной задачи кинематики для робота Delta / Д.С. Колтыгин, И.А. Седельников, Н.В. Петухов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 5 (124). – С. 87–95.
7. Закиров, Р.И. Определение кинематических характеристик дельта-робота по заданным параметрам рабочей области / Р.И. Закиров, М.И. Алиев, А.И. Морозов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Т. 14, № 4. – С. 11–16.
8. Захаров, О.В. Расчет рабочей зоны дельта-принтера / О.В. Захаров, Ф.Д. Сулейманова // Актуальные проблемы станкостроения – 2023: сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2023. – С. 197–200.
9. Садилов, М.Д. Моделирование движения дельта-робота по заданной траектории с целью определения силовых факторов, действующих на его приводы и шарниры / М.Д. Садилов, Г.А. Тимофеев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 11 (740). – С. 22–30.

РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРЕДМЕТА ИНТЕРЬЕРА

Услин Д.А., студент

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

Создана концепция и разработана 3D-модель изделия интерьера «Мини-бар в китайском стиле», определены назначение изделия и его художественный стиль, выбран материал и выявлены его преимущества, такие как прочность, долговечность, эстетические качества, определен способ изготовления с учетом особенностей геометрии и материала изделия.

Ключевые слова: мини-бар, китайский стиль, обработка изделия, мебельный щит, 3D-моделирование

DEVELOPMENT OF A 3D MODEL AND MANUFACTURE OF AN INTERIOR ITEM

Uslin D.A., student

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: uslin.denis@bk.ru*

A concept was created and a 3D model of the interior product “Mini bar in Chinese style” was developed, the purpose of the product and its artistic style were determined, the material was selected and its advantages such as strength, durability, aesthetic qualities were identified, the manufacturing method was determined taking into account the specifics of the geometry and material of the product.

Keywords: minibar, Chinese style, product processing, furniture shield, 3D modeling

Предмет интерьера – мини-бар – это символ утонченного стиля и домашнего уюта, также он позволяет удобно разместить любимые напитки и аксессуары, придавая интерьеру функциональность и эстетическую привлекательность и становясь идеальным дополнением для вечерних встреч.

Главное преимущество мини-баров заключается в их удобстве и доступности. Они предоставляют возможность наслаждаться разнообразными напитками и закусками, не покидая пределы комнаты. Мини-бары становятся настоящим оазисом для тех, кто ценит время и не любит лишние перемещения в поисках чего-то вкусного.

На рынке представлено огромное количество различных вариантов мини-баров из дерева, однако они зачастую слишком маленькие и не вмещают достаточного количества напитков, также они выглядят однотипно и скучно.

Таким образом, было принято решение создать изделие, которое будет функциональным, практичным и привлекательным. Стиль изделия был выбран китайский, так как на сегодняшний день он достаточно быстро набирает популярность и проявляется в различных сферах – от архитектуры и моды до искусства и кулинарии. Китайский стиль характеризуется минимализмом и функциональностью. Основные элементы китайского стиля в интерьере – это использование природных материалов, таких как дерево и камень. Цветовая палитра варьируется от нежных пастельных тонов до ярко-красных и золотых оттенков. Чаще всего используются золотой, красный и черные цвета. Золотой представляет собой процветание и благополучие, красный символизирует счастье и удачу, черный олицетворяет величие и стабильность. Акцент делается на симметрии и пропорциях, ведь они отражают гармонию и баланс [1].

При разработке изделия мы постарались передать характерные черты китайского стиля в его симметричных формах и минимализме, так как простота форм и гармония пространства создают неповторимую атмосферу спокойствия и умиротворения. Не забыты практичность и функциональность – внутреннее пространство оптимально организовано, имея достаточно места для хранения самых разнообразных напитков.

При моделировании была использована программа КОМПАС-3D (рис. 1), так как она имеет все необходимые функции для реализации проекта, включая интерфейс. КОМПАС-3D применялся для создания нескольких моделей, которые затем объединялись в сборку. [2]

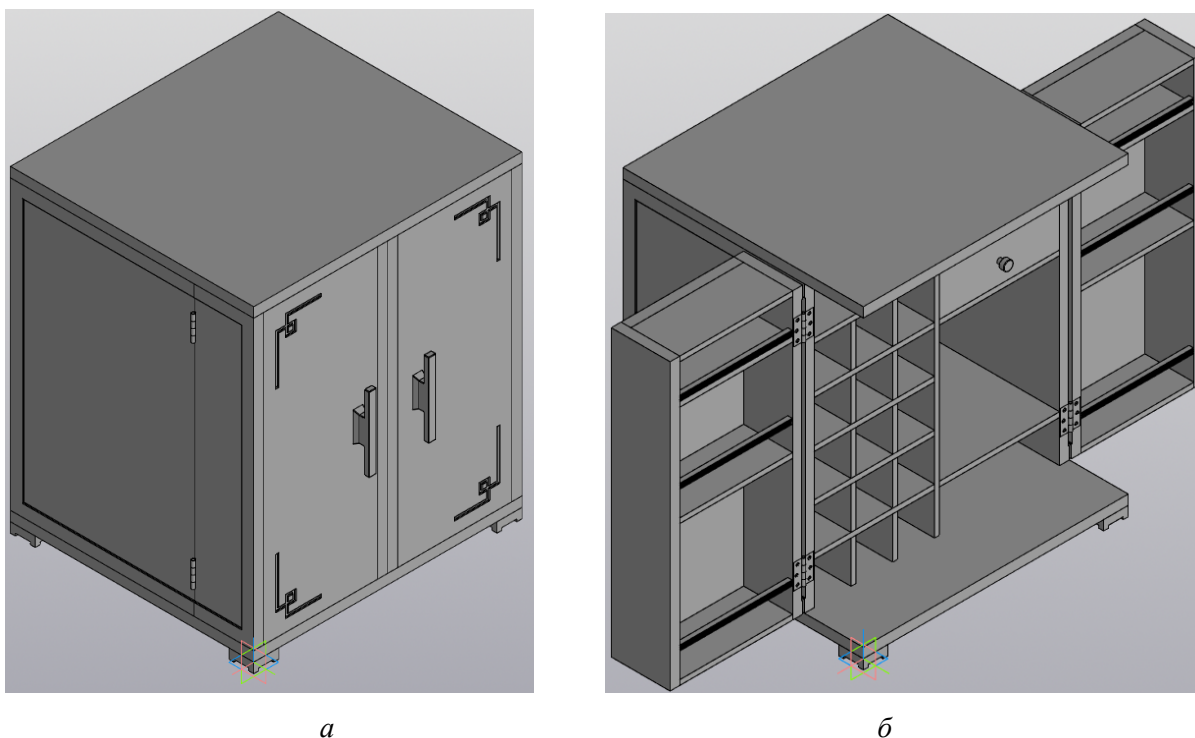


Рис. 1. Модель-концепция изделия:

- а* – закрытый вариант;
- б* – открытый вариант

Материалом для изготовления служит мебельный щит из дуба 20 мм и 10 мм, покрашенный в красный и черный цвета. Дуб – один из самых ценных видов древесины, он обладает высокой прочностью и устойчивостью к механическим повреждениям, при этом дуб легко обрабатывается. [3]

Обработка изделия была выполнена в программе Siemens NX после экспорта модели из КОМПАС-3D, что в дальнейшем позволит производить фрезерование на специализированных станках с ЧПУ. Эта программа обеспечивает высокую точность обработки, экономию материала и широкие возможности для создания различных предметов интерьера, мебели и других изделий, также в ней можно управлять жизненным циклом продукта [4].

Рендер проводится в программе Blender, так как она бесплатна и предлагает мощный движок Cycles, который обеспечивает фотореалистичное освещение и материалы, позволяя добиться исключительного качества изображения. Помимо этого, Blender обладает широкими возможностями постобработки деталей. Программа Blender проста в освоении и интуитивно понятный интерфейс не доставит проблем, а также постоянные обновления делают ее лучше [5, 6].

Рендер готового предмета (рис. 2) интерьера был выполнен с учетом эксплуатации изделия, а именно было частично заполнено внутреннее и внешнее пространство изделия. При подготовке рендера особое внимание было уделено текстурам, подчеркивающим красоту дуба, и цветовой палитре, свойственной китайскому стилю.



а



б

Рис. 2. Рендер готового изделия:

а – закрытый вариант;

б – открытый вариант

Таким образом, в результате проделанной работы была разработана концепция изделия, 3D-модель и ее реалистичная визуализация, выбраны материал для будущего изделия, который отвечает высоким стандартам прочности и долговечности, а также способ его обработки с использованием современных технологий, обеспечивающих высокую точность. Данный проект был выполнен с учетом современных тенденций и потребностей рынка, что обеспечивает конкурентоспособность изделия в современной экономике. Благодаря детальной проработке всех элементов и технических характеристик обеспечивается легкость в его производстве и дальнейшей эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Китайское искусство [Электронный ресурс]. – URL: http://library.lgaki.info:404/2020/Белецкий_Китайское.pdf
2. Родионов, В.А. Моделирование рельефной матрицы для получения оттиска на тонколистовом материале в программе SolidWorks / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Высокие технологии в машиностроении: материалы Всерос. науч.-техн. конференции. – Самара, 2018. – С. 112–115.
3. Андреева, Е.А. Художественная работа по дереву / Е.А. Андреева. – М.: Рипол Классик, 2007. – 384 с.
4. Родионов, В.А. Моделирование обработки матрицы для получения рельефного оттиска на токарном материале / В.А. Родионов, Н.О. Солодова // Молодежная наука: вызовы и перспективы: материалы II Всерос. научно-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Сызрань, 2019. – С. 128–130.
5. Рендеринг и обработка в Blender [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.school-xyz.com/blog/render-i-obrabotka-v-blender>
6. Работа с материалами в Blender [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.school-xyz.com/blog/rabota-s-materialami-v-blender>

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛА НЕПРОФИЛЬНЫХ АКТИВОВ ИМУЩЕСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА АВИАСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Черепанова М.С., аспирант

*Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация
E-mail: cheremaha@yandex.ru*

Статья посвящена проблеме управления недвижимостью из состава непрофильных активов имущественного комплекса авиастроительных объединений на примере предприятий ПАО «ОАК». Приведены основные причины, по которым возникает сложность при выявлении данного сегмента активов, а также при их дальнейшем управлении. В качестве инструментария в описанных процессах автором предложено использование теории нечётких множеств, которая становится популярна в некоторых эконометрических и оптимизационных задачах. Приведено применение данной теории, сформулированы правила работы алгоритма выбора непрофильной недвижимости при использовании нечеткого моделирования.

Ключевые слова: оценка потенциала активов, управление имущественным комплексом авиастроительного предприятия, управление авиастроительным предприятием, цифровизация, алгоритм нечетких множеств, нечеткая логика, цифровые технологии

METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR ASSESSING THE POTENTIAL OF NON-CORE ASSETS OF THE PROPERTY COMPLEX OF AN AIRCRAFT MANUFACTURING ENTERPRISE BASED ON FUZZY SET ALGORITHMS

Cherepanova M.S., PhD student

*Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation
E-mail: cheremaha@yandex.ru*

The article is devoted to the problem of managing real estate from non-core assets of the property complex of aircraft building associations using the example of the enterprises of PJSC UAC. The main reasons for the difficulty in identifying this segment of assets, as well as in their further management, are given. As a tool in the described processes, the author suggests the theory of fuzzy sets, which is becoming popular in some econometric and optimization problems. A brief application of this theory is given, and the rules for the operation of the algorithm for selecting non-core real estate using fuzzy modeling are formulated.

Keywords: asset potential assessment, aircraft manufacturing enterprise property complex management, aircraft manufacturing enterprise management, digitalization, fuzzy sets algorithm, fuzzy logic, digital technologies

За длительное время существования отрасли авиастроения инфраструктура, насчитывающая тысячи квадратных метров, «обросла» порой излишками социального фонда – объектами, требующими таких мер управления, как продажа или ликвидация. В некоторых случаях возникает острая нехватка производственных площадей, оборудованных в соответствии с новейшими технологиями, что требует принятия мер активной реконструкции или нового строительства. Отметим, что разработанность темы управления непрофильными активами, а именно недвижимостью социального, промышленного и иного назначения, в составе основных фондов авиаотрасли в отечественной научной литературе низкая, поэтому автором было принято решение о проведении исследования методов и приемов управления данными

активами в контексте цифровизации организационных процессов; также предпринята попытка проиллюстрировать инструментарий, заимствованный из области математики.

В настоящее время внедрение и активное использование механизмов цифровой трансформации управленческой деятельности на высокотехнологичных авиастроительных предприятиях носит сверхактуальный характер. Внедряющиеся процессы цифровизации, в том числе в сферу управления имущественным комплексом отрасли, требуют использования новых организационно-экономических подходов, что предопределяет повышенное внимание к методикам, приемам и методам управления. В контур данных тематик входит и проблема управления непрофильными активами отрасли из состава всего имущественного комплекса.

При проведении исследования были использованы общенаучные методы систематизации и классификации данных, анализа и обобщения информации, метод математического моделирования. Информационную основу работы составили законодательные и нормативные акты, научные публикации в журналах и сборниках, диссертационные исследования, собственные исследования автора, а также документы, размещенные на официальном сайте корпорации – Реестр активов ПАО «ОАК»¹.

Для выработки научно обоснованных решений в сфере управления непрофильными активами из состава имущественного комплекса отрасли необходимо комплексное представление о состоянии основных фондов с одной стороны, и о скопившемся потенциале ненужных, «отягощающих» активов – с другой [1]. Процесс управления такими объектами состоит формально из двух: выявление непрофильного объекта (к примеру, гаража для а/м – объекта, относящегося к социальной инфраструктуре) и дальнейшее управление объектом. Отмечу, что термин «непрофильные активы» закреплен в ряде документов, в том числе – в Программе реализации непрофильных активов ПАО «ОАК»², действующей на период 2018–2020 гг. (Программа) и в соответствии с методическими рекомендациями по выявлению и отчуждению непрофильных активов, утвержденными распоряжением Правительства Российской Федерации от 10 мая 2017 года № 894-р³. Таким образом, существует законодательно утвержденный регламент по выявлению непрофильных активов – назовем их активами «второстепенного значения», утвержденный аппаратом управления. Парадоксально, но часто мнения управленцев и производственников не сходятся, в том числе по описанным процессам: так, последние убеждены, что любые активы авиаотрасли из второстепенного значения могут быть отнесены к первостепенным и, как правило, в сверхкороткие сроки под влиянием внешних факторов – экономической и политической ситуации. Данным процессам в условиях сегодняшнего дня можно посвятить целое научное исследование, но остановимся на методике оценки потенциала непрофильных активов как на предмете исследования. Объектом исследования является имущественный комплекс отрасли авиастроения и, в частности, сегмент комплекса – непрофильные активы.

В проведенных ранее исследованиях, к примеру, в работе М.М. Мусатовой, приводятся следующие факты, характеризующие необходимость оптимизации производственных площадей ОАК: «в собственности «ОАК» находятся гигантские производственные мощности, несопоставимые с количеством выпускаемых самолетов. Так, производственные площади заводов «ОАК» составляли свыше 40 млн м², у Boeing – менее 10 млн м², а у Airbus – порядка 15 млн м². При том, что американские и европейские производители выпускают ежегодно по 800 самолетов всех типов, «ОАК» производит примерно 150» [2]. Данное сравнение показателей, характеризующих деятельность российского авиапрома с мировыми лидерами авиастроения, скорее всего, будет подвержено резкой критике, так как по приведенным данным невозможно провести сравнительный анализ из-за разницы формата организационных структур и интернационализации отрасли. А.Н. Васильцовой отмечено, что «практически любой коммерческий самолет сегодня содержит детали, произведенные

¹ Сайт ПАО «ОАК» [Электронный ресурс]. – URL: <https://uacrussia.ru/ru/corporation/>

² Там же

³ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 10 мая 2017 года № 894-р [Электронный ресурс]. – URL: <http://static.government.ru/media/files/YRjcUEA4MT3hq548h3wrtfwmDaEHBhx8.pdf>

в нескольких странах мира, а зачастую и не в одном десятке государств» [3, с. 66], а также, что территориальная диверсификация является предпосылкой возникновения в авиастроении такого явления, как цепочка поставок. Так, система взаимодействия крупных международных компаний представляет собой вертикальную структуру, производственные площадки которой находятся в разных городах и континентах, поэтому сравнение имущественных комплексов корпораций для настоящего исследования не имеет смысла. К примеру, по открытым данным сети Интернет, организационная структура корпорации Boeing насчитывает множество производственных площадок, расположенных в 67 странах мира. Российское же самолетостроение проводит попытки организовать завершённый производственный цикл внутри страны.

Согласимся, что процессу оптимизации деятельности авиапредприятия как имущественного комплекса отведена ведущая роль, но, к сожалению, в научном поле по данному вопросу имеется ограниченное количество исследований в силу высокого уровня конфиденциальности информации, хотя имеются исследования по смежным вопросам, в том числе по проблемам физического износа основных фондов авиаотрасли [4–6]. По этой причине автором обращено внимание на изучение объекта с точки зрения внедрения информационных технологий в деятельность отрасли.

В своей работе, посвященной цифровизации российской авиаиндустрии, А.А. Ермаков, С.В. Тихонова демонстрируют примеры цифровой трансформации на предприятии ПАО «ОАК» и отмечают, что «наиболее перспективными механизмами цифровизации в авиастроении можно признать:

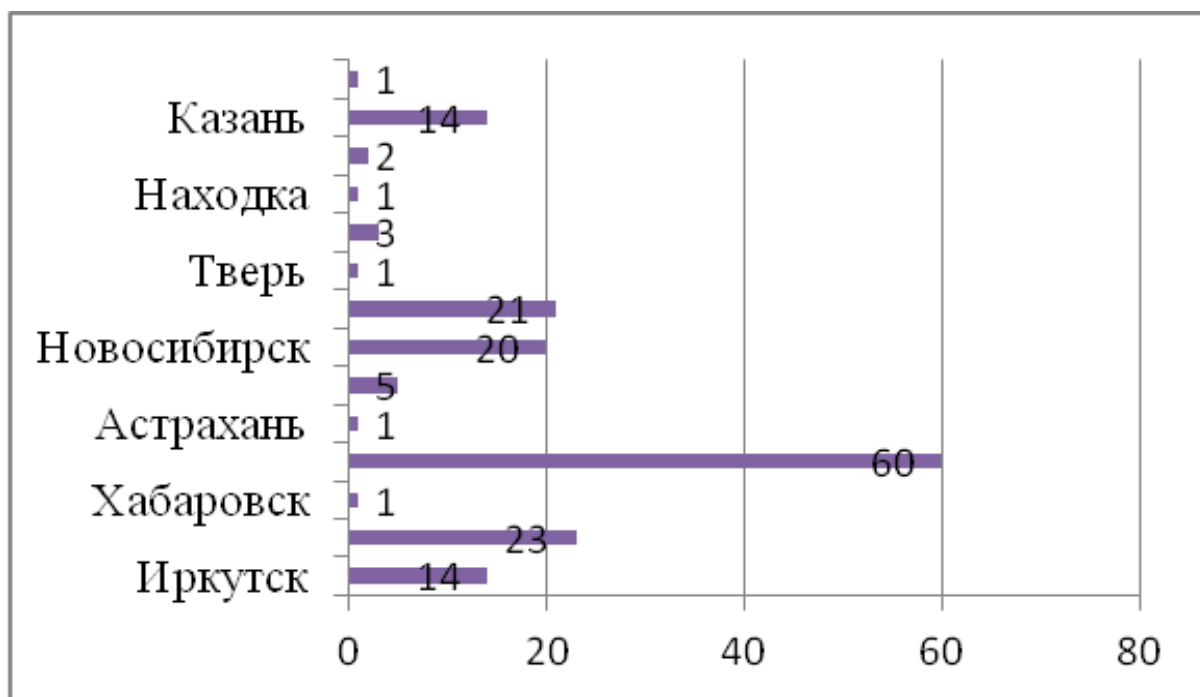
- создание цифровых двойников самолетов и авиадвигателей;
- проектирование, оптимизацию, производство конструкций с использованием аддитивных технологий, композиционных материалов;
- создание изогридных конструкций;
- технологии искусственного интеллекта;
- аналитику на основе Big Data;
- семантический поиск по большим объемам информации;
- применение виртуальной реальности при проектировании, производстве и поддержке эксплуатации самолетов;
- промышленный интернет вещей (IoT);
- технологии прогнозной аналитики отказных состояний» [7].

В более раннем исследовании трансформации авиакосмической отрасли М.И. Самогородской, И.А. Бейнар, Т.С. Наролиной дано следующее понятие: «под цифровым предприятием понимается хозяйствующий субъект, применяющий цифровые и телекоммуникационные технологии во всех плоскостях своей деятельности (исследованиях и разработках, производственных процессах, материально-техническом обеспечении и маркетинге и др.), в результате чего достигает «конкурентного преимущества высокого порядка» [8]. В качестве промежуточных выводов отметим, что цифровая трансформация распространяется не только на производственные процессы и технологии в авиастроении, но и на организационную структуру отрасли. О данном факте как об актуальной проблеме оптимизации деятельности авиастроительных предприятий в СМИ существуют и заявления официальных лиц⁴.

Стоит отметить, что процессы цифровой трансформации, как любая инновационная деятельность, требуют наличия уже имеющихся отработанных схем, на базе которых и происходит внедрение нового. Такой «схемой» может быть некая технологическая схема на авиапредприятии, а именно принципы выявления количественных и качественных характеристик исследуемого объекта. Если говорить о количественной характеристике, то в этом вопросе можно обратиться к бухгалтерскому учету, предлагающему цифры номинального порядка: n – количество объектов недвижимости или n – количество тыс. кв. м. Но есть и качественные характеристики объектов такого разнообразного комплекса с более емким процессом составления классификации.

⁴ Официальный сайт конференции «Цифровая индустрия промышленной России» [Электронный ресурс]. – URL: <https://cipr.ru/>

Ранее автором было проведен обзор структуры и размещения объектов недвижимости в составе непрофильных активов предприятий авиаотрасли на примере российской авиастроительной корпорации ПАО «ОАК» с помощью заимствованных из области географии методов. По проведенному анализу выявлены наиболее «загруженные» непрофильной недвижимостью регионы присутствия авиапредприятий. Внимание уделено визуализации размещения активов по городам России с целью выявления проблемных мест имущественного комплекса, приведены некоторые карты размещения активов [1]. Так был проведен анализ данных по непрофильным активам Корпорации по городам РФ, в составе которых имеются до сотни объектов недвижимости (например, гаражные кооперативы) (см. рисунок).



География размещения непрофильных активов дочерних обществ ПАО «ОАК» [1, с. 687]

Следующим шагом для решения изучаемого вопроса предлагается к рассмотрению «теория нечетких множеств», которая ранее была применена М.А. Латышевой для анализа «процедуры обработки неявно выраженных данных для принятия стратегических управленческих решений» [9].

Тут стоит дополнительно отметить, что имеются исследования, посвященные изучению недвижимости в контексте ее оценки, в них отмечена возможность применения метода нечетких множеств (нечеткой логики Fuzzy logic) в случае, когда другие подходы к оценке неприменимы [10, 11]. Целью этих исследований «является разработка инструмента, основанного на нечеткой логике, для анализа и оценки сложных взаимосвязей между различными факторами, влияющими на стоимость.» [11] Авторы предпринимают попытки выявить факторы, влияющие на ценообразование в различных регионах, которые будут входными переменными нечеткой модели с целью разработки базы правил для реализации в среде fuzzyTECH путем определения логических связей (между факторами и их влиянием на цену недвижимости)

Предположим, что нами выявлены некие качественные характеристики непрофильных активов отрасли авиастроения на примере реестра ПАО «ОАК»⁵, представленные в форме следующей структуры (табл. 1, 2):

⁵ Официальный сайт ПАО «ОАК» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.uacrussia.ru/ru/corporation/non-core_assets_implementation/

Структура дочерних и зависимых обществ ПАО «ОАК», располагающих активами

| | |
|---|------------------------------|
| Наименование дочернего общества, в чьем ведении находился актив на период 2018–2020 гг. (структура и название общества приведены в соответствии с информацией в рассматриваемый период) | ПАО «Корпорация «Иркут» |
| | АО «Авиастар – СП» |
| | ПАО «ВАСО» |
| | АО «ГСС» |
| | ПАО «Ил» |
| | АО «ЛИИ им. М.М. Громова» |
| | АО «РСК «МиГ» |
| | ОАО «ОКБ им. А.С. Яковлева» |
| | ПАО «Компания «Сухой» |
| | ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бернева» |
| | ПАО «Туполев» |
| АО» ЭМЗ им. В.М. Мясищева» | |

Таблица 2

Качественные характеристики непрофильных активов ПАО «ОАК»

| Основные характеристики актива как единицы управленческого учета | | | | | | | | |
|--|--|---|-----------------------------------|---|-----------------------------|--|-------------------|----------------------|
| Порядковый номер | Наименование актива/ комплекса активов | | | Классификация | Тип | | | |
| Основные характеристики объекта как недвижимости в составе актива (в том числе земельные участки) | | | | | | | | |
| Наименование | Местонахождение | Основная характеристика: площадь, протяженность | Основная характеристика, значение | Единица измерения основной характеристики | Кадастровый номер | Кадастровая стоимость | Инвентарный номер | Остаточная стоимость |
| Правоустанавливающие документы | | | | | | | | |
| Наименование | | Номер | | Дата регистрации | | Рыночная стоимость (наличие оценки) | | |
| Информация об активах по форме реализации | | | | | | | | |
| Планируемая цена реализации | Планируемый контрагент | Сведения об обременениях | Форма реализации | Стратегия, применяемая в отношении актива | Планируемая дата реализации | | Примечания | |

* Составлено автором по источнику [12]

Итак, для более детального анализа оценки потенциала рассматриваемых объектов помимо предложенных характеристик, полученных автором на основе простого анализа реестра активов Корпорации, понадобятся и иные. Такими характеристиками могут быть специальные характеристики технического характера, экологического формата или локационного размещения и другие, которые могут быть сформулированы соответствующими экспертами. Далее для разработки более эффективной модели оценки влияния ряда характеристик на их потенциал (ценность) необходимо использовать несколько блоков правил нечеткого

ввода, поэтому на данном этапе понадобится ввести следующие переменные – как вариант, данные, характеризующие корреляционные связи, к примеру, следующие:

– коэффициент зависимости выпуска готовой продукции от количественного показателя производственных площадей авиапредприятия;

– коэффициент зависимости выпуска готовой продукции от количественного показателя площадей социального фонда, не участвующего в производственном процессе предприятия.

Таким образом, модель будет состоять из нескольких блоков переменных, характеризующих количественные и качественные показатели недвижимости, а также характеристики, отражающие зависимость от выпуска готовой продукции. Далее для создания модели оценки влияния перечисленных характеристик объектов на уровень их потенциала, можно сказать, их «ценностной стоимости», которую они представляют, необходимо будет формализовать входные и выходные переменные – множества, оцениваемые определенным образом. Предположим, что для входных переменных будет существовать несколько уровней оценки: {Low (низкая), Medium (средняя), High (высокая)}, для выходных переменных – {very_low (очень низкая), low (низкая), medium (средняя), high (высокая), very_high (очень высокая)} с заданной логикой соответствия. Следующим шагом является составление списка эвристических правил для промежуточных переменных и итоговой выходной переменной, строится нечеткая логическая модель в программном пакете fuzzyTECH. Данная методика более полно описана в исследовании А.А. Копнина, Д.В. Прокошева на примере методики нечеткой логики с целью оценки недвижимости.

Как результат, на базе сформулированных качественных характеристик и с помощью специального алгоритма – применения теории нечетких множеств – удастся проанализировать входные переменные, несущие тот или иной потенциал, и выявить их новые характеристики. Итоговые показатели, полученные в рамках описанной методики и отражающие «уровень ценности» конкретного объекта или группы объектов недвижимости, можно будет использовать для выработки стратегии в отношении этих объектов и дальнейшего управления. В этом случае данная методика будет интерпретировать качественные факторы в количественные данные.

Предложенная методика оценки потенциала непрофильных активов авиапредприятий, в состав которых входят разнообразные объекты недвижимости из состава имущественного комплекса, имеющие набор из различных классификационных признаков, с использованием нечетких технологий управления, возможно, дополнит существующие методы выявления таких активов. Данные процессы напрямую затрагивают структуру управления предприятиями авиаотрасли, находящимися в активной фазе цифровизации, что позволяет решать новые задачи на всех уровнях управления, опираясь на существующие методики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Черепанова, М.С. Анализ и оценка ресурсной базы авиастроительного комплекса России и выявление экономического потенциала в управлении недвижимостью из состава непрофильных активов / М.С. Черепанова // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2024. – Т. 14, No 4. – С. 684–694. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-4-684-694>. – EDN WJBNBM.
2. Мусатова, М.М. Новые индустриальные модели и системы управления в компаниях ГК «Ростех» / М.М. Мусатова // Мир новой экономики. – 2021. – № 15 (4). – С. 100–112. – DOI: 10.26794/2220-6469-2021-15-4-100-112.
3. Васильцова, А.Н. Территориальная структура российского гражданского авиастроительного комплекса: дис. ... канд. экон.-географ. наук / Васильцова А.Н.: 1.6.13. – Москва, 2023. – 182 с.
4. Родин, И.И. Совершенствование системы стратегического управления федеральным имуществом РФ на примере непрофильных активов АО «Центр управления непрофильными активами атомной отрасли» государственной корпорации «Росатом» / И.И. Родин // Статистика и экономика. – 2015. – № 6. – С. 33–39.
5. Олейникова, М.В. Разработка организационно-экономического механизма развития производственного потенциала предприятий авиастроения в условиях цифровой экономики [Электрон-

- ный ресурс] / М.В. Олейникова, А.Е. Сорокин, С.А. Ковтун // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-organizatsionno-ekonomicheskogo-mehanizma-razvitiya-proizvodstvennogo-potentsiala-predpriyatiy-aviastroeniya-v-usloviyah> (дата обращения: 14.08.2024).
6. Черепанова, М.С. Обзор непрофильных активов ПАО «Яковлев» по плану реализации 2018–2020 гг. / М.С. Черепанова, А.Ф. Шуплецов // Развитие малого предпринимательства в Байкальском регионе: материалы 6-й междунар. науч.-практ. конференции (г. Иркутск, 23 ноября 2023 г.). – Иркутск, 2024. – С. 278–285. – EDN RUTEXM.
 7. Ермаков, А.А. Цифровая трансформация в авиационной индустрии / А.А. Ермаков, С.В. Тихонова // Московский экономический журнал. – 2023. – № 1. – С. 294–304.
 8. Самогородская, М.И. Особенности цифровой трансформации предприятий авиакосмической отрасли / М.И. Самогородская, И.А. Бейнар, Т.С. Наролина // РСЭУ. – 2020. – № 1 (48). – С. 91–97.
 9. Латышева, М.А. Аппарат теории нечётких множеств как инструмент оценки потенциала малоэффективных золотоносных россыпей / М.А. Латышева // Евразийский союз ученых. – 2018. – № 8–4 (53). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/apparat-teorii-nechyotkih-mnozhestv-kak-instrument-otsenki-potentsiala-maloeffektivnyh-zolotonosnyh-rossypey> (дата обращения: 05.01.2025).
 10. Воронина, Е.В. Формирование научно-обоснованного механизма управления региональным рынком услуг недвижимости / Е.В. Воронина, О.Б. Ярош, Н.В. Береза // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. – 2019. – № 2 (47). – С. 246–258.
 11. Копнин, А.А. Нечеткая модель оценки влияния факторов ценообразования на стоимость первичного жилья / А.А. Копнин, Д.В. Прокошев // Цифровые модели и решения. – 2023. – Т. 2, № 2. – DOI: 10.29141/2782-4934-2023-2-2-4. – EDN GECTSE.
 12. Черепанова, М.С. Оценка цифровых инструментов управления развитием ресурсной базы предприятий авиастроительной отрасли / М.С. Черепанова // Baikal Research Journal. – 2025. – Т. 16, № 1.

Секция 4. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ КОМПОЗИЦИИ AlN-TiC МЕТОДОМ АЗИДНОГО СВС С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕЛАМИНА В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА УГЛЕРОДА

Андряшкин Д.В., аспирант, **Майдан Д.А.**, доцент, к.т.н., доцент

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

Представлены результаты исследования процессов горения азидных систем СВС $xAl+3Ti+NaN_3+C_3H_6N_6+NH_4F$. Проведены рентгенофазовый и микроскопический анализ полученных продуктов реакции. Удалось синтезировать композиции AlN-TiN-TiC и AlN-TiN-TiC_{0,5}N_{0,5}.

Ключевые слова: карбид титана, нитрид алюминия, СВС-аз, синтез, высокодисперсная керамическая композиция, карбонитрид титана, керамическая композиция

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF OBTAINING OF HIGHLY DISPERSED AlN-TiC CERAMIC COMPOSITION BY AZIDE SHS WITH MELAMINE AS A CARBON SOURCE

Andriyashkin D.V., PhD 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*

This work presents the results of the study of combustion processes of SHS azide systems $xAl+3Ti+NaN_3+C_3H_6N_6+NH_4F$. X-ray phase and microscopic analyses of the obtained reaction products have been carried out. AlN-TiN-TiC and AlN-TiN-TiC_{0,5}N_{0,5} compositions were synthesized.

Keywords: titanium carbide, aluminum nitride, SHS-az, synthesis, highly dispersed ceramic composition, titanium carbonitride, ceramic composition

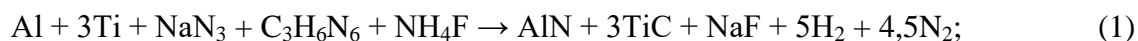
Бесцветные кристаллы нитрида алюминия обладают высокой температурой плавления (от 2000 до 2500 °С), высокой теплопроводностью 30,2–25,1 Вт/(м·К), хорошими диэлектрическими свойствами. Также к немаловажным свойствам нитрида алюминия можно отнести его стойкость к тепловому удару, действию кислот и высоких температур в различных газовых средах. Благодаря диэлектрическим свойствам и низкому коэффициенту теплового расширения нитрид алюминия стал перспективным материалам в электротехнических и электронных устройствах [1–3].

Карбид титана представляет собой светло-серые кристаллы и обладает следующими свойствами: высокой температурой плавления (~3260 °С), высокой теплотой образования и высокой теплотой кипения (~4300 °С). Теплопроводность карбида титана при температуре ниже -173 °С увеличивается с ростом его дефектности по углероду. Также карбид титана характеризуется высокой микротвердостью – от 15000 до 31500 МПа, а твердость по шкале Моса 8–9 ед. Данные свойства TiC обеспечивают его широкое применение в различных областях техники [4–5].

Сочетание этих материалов позволяет синтезировать композицию, которая объединяет свойства обоих компонентов. Один из способов получения такой композиции – это технология СВС. Технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза обладает неоспоримыми преимуществами, среди которых: высокая экономичность, быстрота процесса синтеза, высокий выход чистого продукта, а также отсутствие в необходимости использовать дополнительное специальное оборудование.

В данной работе проведено исследование по получению высокодисперсной керамической композиции «нитрид алюминия – карбид титана» по азидной технологии СВС с применением меламина в качестве источника углерода из смеси $x\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$.

Для получения нитрида алюминия – карбида титана изучались реакции с применением меламина и фторида аммония:



Синтез AlN-TiC по азидной технологии СВС проводился с использованием лабораторной установки СВС-Аз, основой которой является лабораторный реактор СВС-Аз постоянного давления с рабочим объемом 4,5 л, сделанный из нержавеющей стали. В процессе синтеза керамической композиции проводились замеры температуры горения. Температура замерялась с помощью термопарного метода с использованием вольфрам-рениевых термопар.

Полученные порошковые композиции исследовались рентгенофазовым (с применением дифрактометра ARL X'trA-138) и микроскопическим (с применением растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6390A) методами.

Порошковая композиция, синтезированная из смеси $\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$ с 1 моль алюминия (рис. 1) имеет три фазы: нитрида алюминия (AlN), нитрида титана (TiN), карбида титана (TiC).

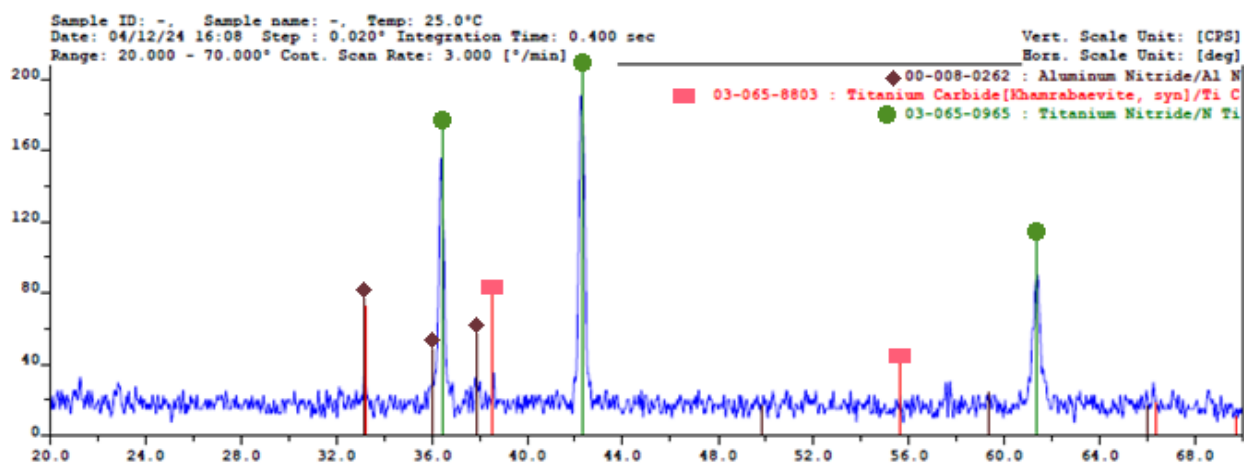


Рис. 1. Рентгенограмма продукта, полученная при сжигании шихты, состоящей из $\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$

Микрофотографии порошка, синтезированного из смеси $\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$ при 1 моль алюминия представлены на рис. 2. Частицы образуются неправильной формы со средним размером 180–290 нм.

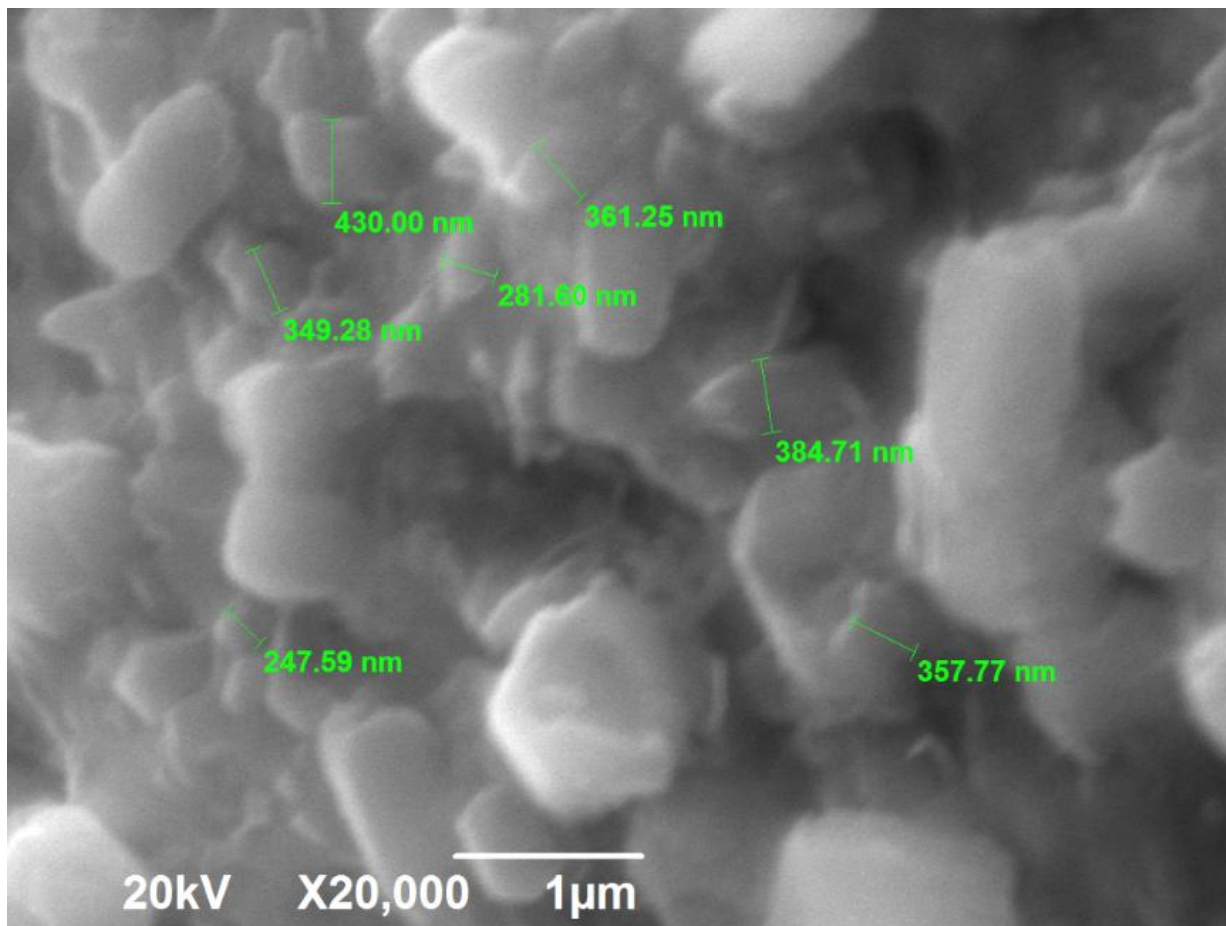


Рис. 2. Морфология частиц промытого порошка, синтезированного в системе $\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$

Порошковая композиция, синтезированная из смеси $2\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$ с 2 моль алюминия (рис. 3) имеет три фазы: нитрида алюминия (AlN), нитрида титана (TiN), карбида титана (TiC).

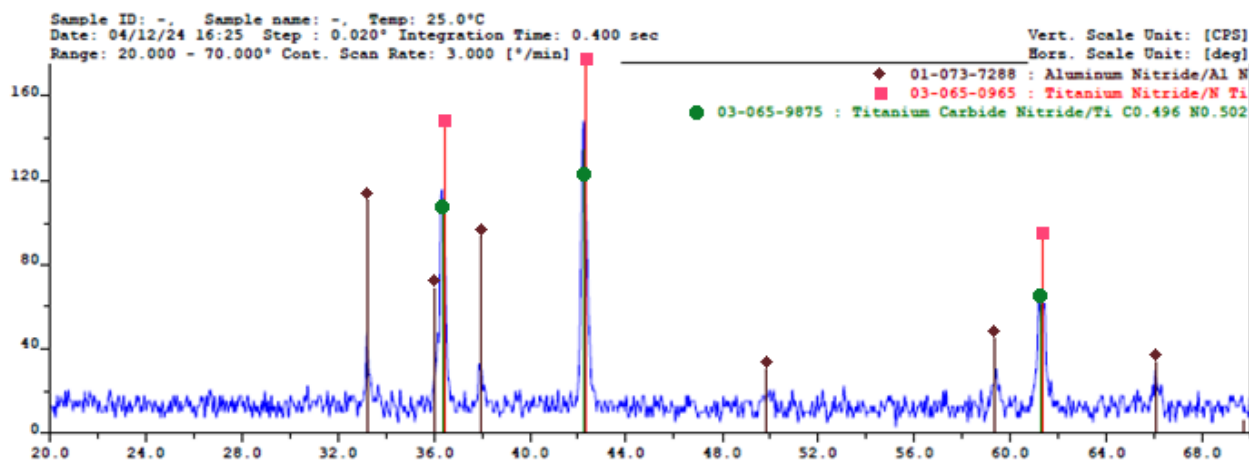


Рис. 3. Рентгенограмма продукта, полученная при сжигании шихты, состоящей из $2\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$

Микрофотография порошка, синтезированного из смеси $2\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$ при 2 моль алюминия, представлена на рис. 4. Частицы образуются неправильной формы со средним размером 200–350 нм.

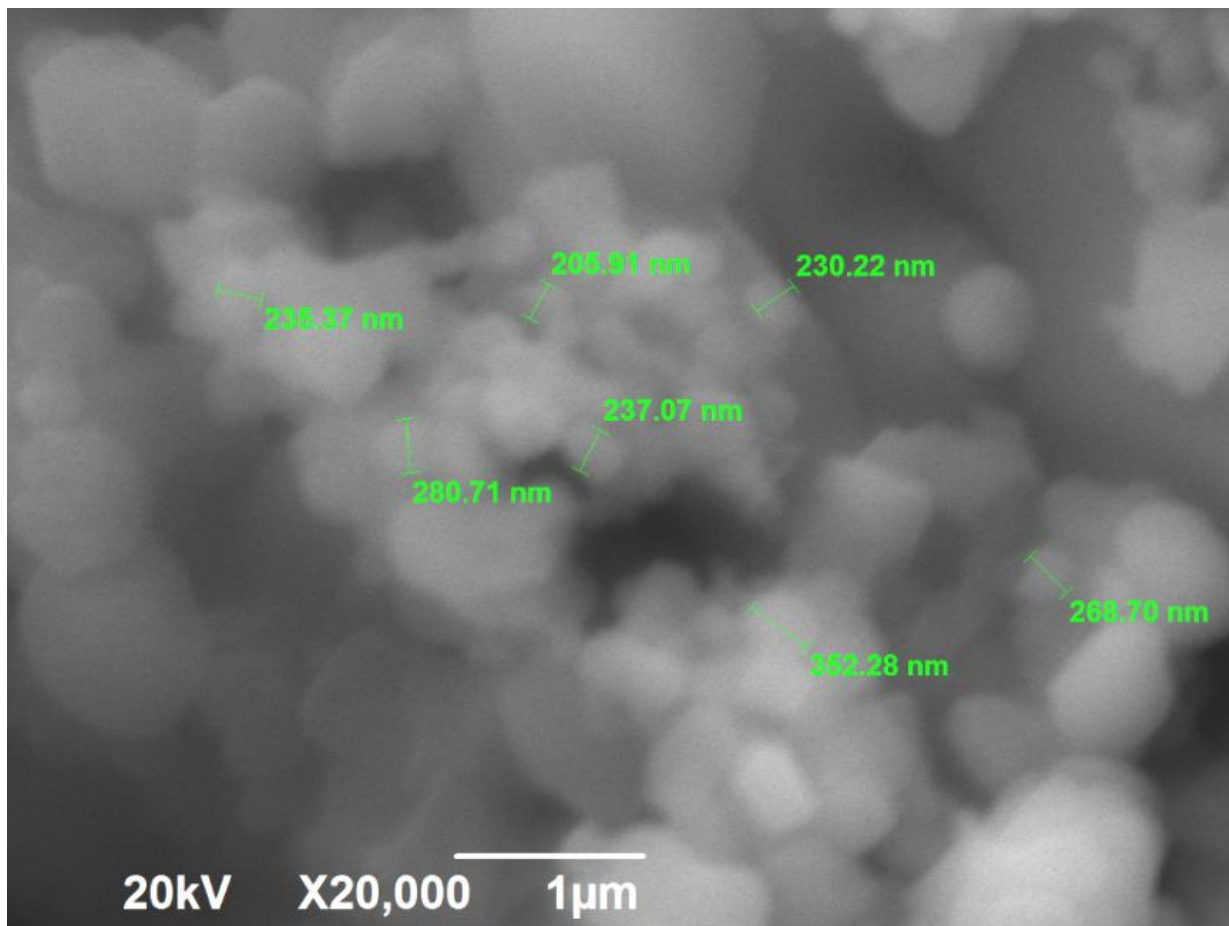


Рис. 4. Морфология частиц промытого порошка, синтезированного в системе $2\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$

Порошковая композиция, синтезированная из смеси $6\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$ с 6 моль алюминия (рис. 5), имеет две фазы: нитрида алюминия (AlN) и карбонитрида титана (Ti_2CN).

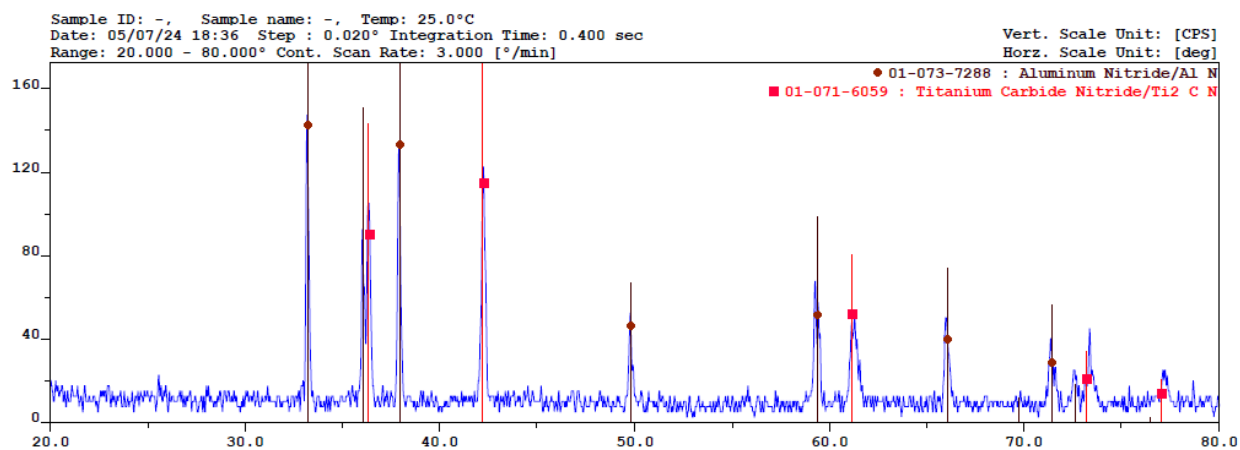


Рис. 5. Рентгенограмма продукта, полученного при сжигании шихты, состоящей из $6\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$

Микрофотография порошка, полученного из смеси $6\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$ при 6 моль алюминия, представлена на рис. 6. Частицы продукта образуются неправильной формы со средним размером 450–900 нм.

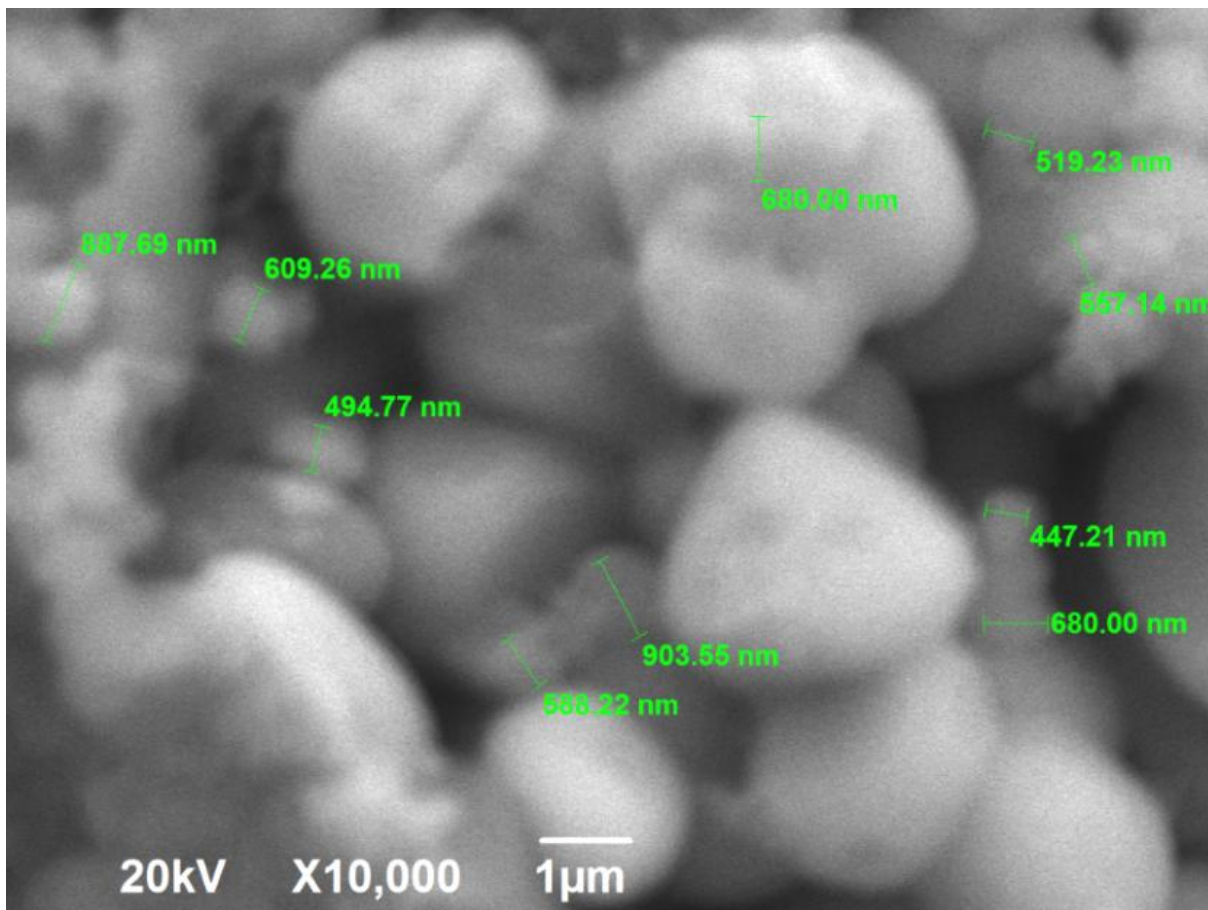


Рис. 6. Морфология частиц промытого порошка, синтезированного в системе $6\text{Al}+3\text{Ti}+\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+\text{NH}_4\text{F}$

Реакции, содержащие в смеси 3 и 9 моль алюминия, представляют продукт, состоящий также из двух фаз: нитрида алюминия (AlN) и карбонитрида титана (Ti_2CN), как и в случае с 6 моль алюминия.

Выводы

Искомая композиция «нитрид алюминия – карбид титана» образуется только с дополнительной фазой либо нитрид титана, либо карбонитрид титана. В первом уравнении получается композиция AlN-TiN-TiC . Во втором уравнении композиция $\text{AlN-TiN-TiC}_{0,5}\text{N}_{0,5}$. В остальных уравнениях получается композиция $\text{AlN-Ti}_2\text{CN}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чухломина, Л.Н. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных нитридсодержащих керамических материалов / Л.Н. Чухломина, Ю.М. Максимов, В.И. Верещагин. – Новосибирск: Наука, 2012. – 260 с.
2. Амосов, А.П. Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов / А.П. Амосов, Г.В. Бичуров. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 526 с.
3. Марков, Ю.М. СВС нитрида алюминия с использованием активирующих добавок / Ю.М. Марков, Е.И. Латухин // Современные материалы, техника и технологии. – 2019. – № 5. – С. 103–110.
4. Уварова, И.А. СВС наноструктурированного порошка нитрида алюминия с применением различных классов галоидных солей и азиды натрия / И.А. Уварова, Ю.В. Титова, Д.А. Майдан // Современные материалы, техника и технологии. – 2019. – № 5. – С. 181–190.
5. Получение высокодисперсной порошковой композиции AlN-TiC методом азидного СВС из шихты $\text{Al-Ti-NaN}_3\text{-C}_2\text{F}_4$ / Г.С. Белова, Ю.В. Титова, Д.А. Майдан, А.Ф. Якубова // Физическое материаловедение: сборник материалов XI международной школы. – Тольятти. – 2023. – С. 110–111.

УДК 669.018.28

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ В УСТАНОВКЕ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВИЛЬНОЙ НА КАЧЕСТВО ЛИТОГО МЕТАЛЛА

Аникеев В.В., к.т.н., доцент

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

Представлены результаты влияния технологии плавки стали и чугуна в установке индукционной плавильной на качество слитков: химический состав, механические свойства, структуру литого металла.

Ключевые слова: установка индукционная плавильная, сталь, чугун, технология плавки, слитки, качество

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF IRON-CARBON ALLOY MELTING TECHNOLOGY IN AN INDUCTION MELTING PLANT ON THE QUALITY OF CAST METAL

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

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

The results of the influence of steel and cast iron melting technology in an induction melting plant on the quality of ingots are presented: chemical composition, mechanical properties, and structure of the cast metal.

Keywords: induction melting plant, steel, cast iron, melting technology, ingots, quality

Опыт показывает, что наиболее перспективными в литейном производстве для плавки железоуглеродистых сплавов являются индукционные тигельные печи [1–4]. В данной работе исследовали качество слитков из серого чугуна марки СЧ20 и износостойкой стали марки 110Г13Л. Плавку проводили в установке индукционной плавильной переплавом отходов заданных сплавов.

Внешний вид установки приведен на рис. 1.



Рис. 1. Установка индукционная плавильная

Основные технические характеристики установки индукционной плавильной приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики установки индукционной плавильной

| Техническая характеристика | Значение |
|--|----------|
| Ёмкость печи, кг | 30 |
| Параметры электропитания: | |
| частота тока питающей сети, Гц | 50 |
| номинальное напряжение, В | 380 |
| Число фаз | 3 |
| Максимальное напряжение в индукторе, В | 1200 |
| Электрические параметры контурной цепи: | |
| мощность преобразователя частоты, кВт | 40 |
| номинальная частота тока, кГц | 10 |
| Максимальная температура перегрева металла, °С | 1700 |
| Расход воды на охлаждение, м ³ /ч | 3,9 |

* Основные технологические параметры плавки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные технологические параметры плавки чугуна и стали

| Параметры плавки | Марка сплава | |
|--|--------------|---------|
| | СЧ20 | 110Г13Л |
| Масса шихты, кг | 20 | 12 |
| Подводимая мощность, кВт | 25 | 30 |
| Продолжительность плавки, мин | 110 | 75 |
| Температура сплава в печи перед выпуском, °С | 1510 | 1540 |

Сплавы заливали в чугунные изложницы на слитки размером 150×100×20 мм массой 4,0 кг.

Внешний вид слитков приведен на рис. 2.



a



б

Рис. 2. Внешний вид слитков:

a – сразу после заливки; *б* – после охлаждения

Исследовали химический состав, механические свойства и микроструктуру заданных сплавов. Результаты исследований приведены в табл. 3–6 и на рис. 3–5.

Таблица 3

Химический состав серого чугуна марки СЧ 20

| Наименование | С | Si | Mn | S | P |
|----------------|---------|---------|---------|---------------|---------------|
| ГОСТ 1412-85 | 3,3–3,5 | 1,4–2,4 | 0,7–1,0 | не более 0,15 | не более 0,20 |
| Опытная плавка | 3,37 | 1,82 | 0,86 | 0,11 | 0,16 |

Таблица 4

Механические свойства серого чугуна марки СЧ 20

| Наименование | σ_B , кгс/мм ² | НВ |
|--------------------------------|----------------------------------|----------|
| ГОСТ 1412-85 | не менее 20,0 | 170- 241 |
| Механические свойства образцов | 21,3 | 192 |

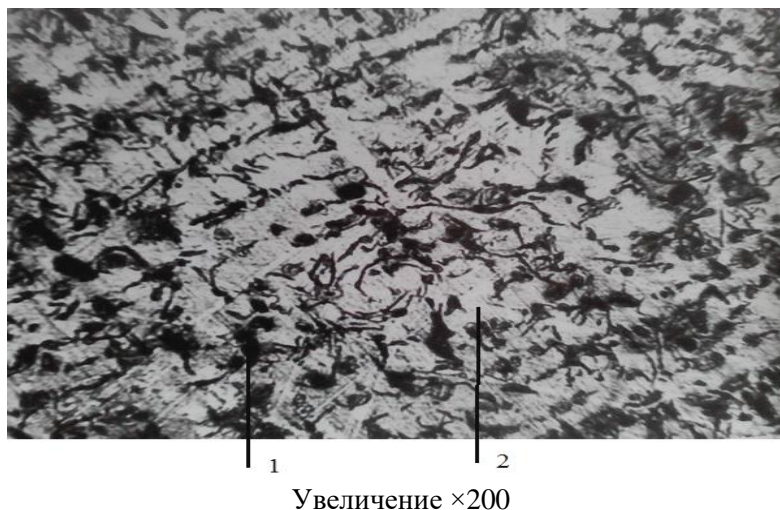


Рис. 3. Микроструктура серого чугуна марки СЧ 20 опытной плавки:
1 – перлит; 2 – феррит



Рис. 4. Излом слитка серого чугуна марки СЧ 20

Химический состав и механические свойства чугуна СЧ20 соответствуют требованиям ГОСТ1412-85.

Таблица 5

Химический состав стали марки 110Г13Л

| Наименование | С | Si | Mn | Cr | Ni | S | P |
|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|------------------|------------------|
| ГОСТ 977-88 | 0,90– 1,50 | 0,30– 1,00 | 11,5– 15,0 | не более 1,0 | не более 1,0 | не более 0,05 | не более 0,12 |
| Опытная плавка | 1,06 | 0,53 | 12,8 | 0,33 | 0,27 | 0,04 | 0,10 |

Механические свойства стали марки 110Г13Л

| Наименование | $\sigma_{в}$, МПа | НВ |
|--------------------------------|--------------------|---------|
| ГОСТ 977-88 | 654–830 | 210–275 |
| Механические свойства образцов | 687 | 242 |

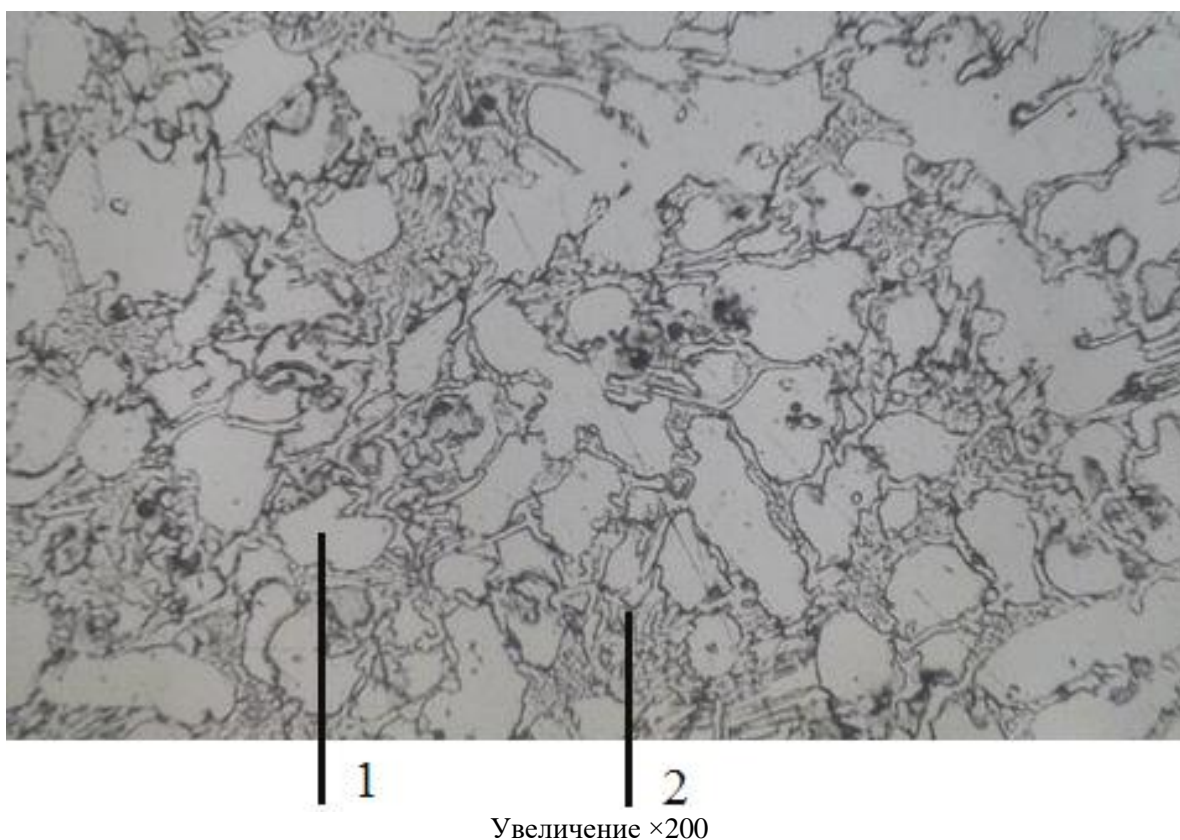


Рис. 5. Микроструктура стали марки 110Г13Л опытной плавки:
1 – аустенит; 2 – карбид марганца Mn_3C

Химический состав и механические свойства стали 110Г13Л соответствуют требованиям ГОСТ 977-88.

Выводы

1. Исследовано влияние переplava отходов в установке индукционной плавильной на качество слитков серого чугуна СЧ20 и износостойкой стали 110Г13Л.
2. Представлены результаты исследований химического состава, механических свойств, микроструктуры и излома (СЧ20) литого металла.
3. Установлено, что химический состав и механические свойства опытных плавок удовлетворяют требованиям ГОСТ 1412-85 (СЧ20) и ГОСТ 977-88 (110Г13Л).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ефимов, В.А. Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
2. Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов / В.А. Кудрин. – М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. – 528 с.
3. Воскобойников, В.Г. Общая металлургия: учебник для вузов / В.Г. Воскобойников, В.А. Кудрин, А.М. Якушев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 768 с.
4. Аникеев, В.В. Современные плавильные установки в центре литейных технологий СамГТУ / В.В. Аникеев, В.И. Никитин, О.А. Забарин // Высокие технологии в машиностроении: всерос. науч.-техн. интернет-конференция. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – С. 175–177.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫМ ОБЖАТИЕМ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ 60С2ХФА

Волков К.Г., научный сотрудник, к.т.н., **Дементьев В.Б.**, руководитель Института механики, д.т.н., **Мокрушина М.И.**, младший научный сотрудник

*Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук, г. Ижевск, Российская Федерация
E-mail: wolkow-kirill@mail.ru*

Современные условия эксплуатации деталей машин требуют от конструкционных материалов комплекса улучшенных свойств. Одним из способов повышения прочностных, пластических и эксплуатационных показателей свойств является высокотемпературная термомеханическая обработка винтовым обжатием. Для выявления механизмов данного процесса были проведены исследования микроструктуры стали 60С2ХФА по двум вариантам: с закалкой и без. Определены размеры зерен исходного образца и образцов после обработки, выявлены основные структурные составляющие.

Ключевые слова: термомеханическая обработка, винтовое обжатие, структура, сталь 60С2ХФА

IMPACT OF HIGH-TEMPERATURE THERMOMECHANICAL TREATMENT BY SCREW COMPRESSION ON THE STRUCTURE OF 60S2HFA STEEL

Volkov K.G., researcher, PhD in Engineering Sciences, **Demytyev V.B.**, Head of the Institute of Mechanics, Grand PhD in Engineering Sciences, **Mokrushina M.I.**, junior researcher

*Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Izhevsk, Russian Federation
E-mail: wolkow-kirill@mail.ru*

Modern operating conditions of machine parts require an increased set of properties from structural materials. One of the ways to increase strength, plastic and operational properties is high-temperature thermomechanical treatment by screws compression. In order to reveal the mechanisms of this process were carried out studies microstructure of 60S2HFA steel under two variants: with and without hardening. There were determined grain sizes of the initial sample and samples after treatment, the main structural components were revealed.

Keywords: thermomechanical treatment, screw compression, structure, 60S2HFA steel, hardening

Введение

Современные условия эксплуатации машин и механизмов требуют от материалов комплекса улучшенных свойств. Зачастую существующие материалы не позволяют обеспечить заданный цикл нагружения изделий, из которых они изготовлены. Для решения сложившейся проблемы производятся попытки улучшения свойств материалов за счет различных подходов, например, применения специальных функциональных покрытий [1, 2], использования биметаллических материалов [3, 4] и др. Значительные результаты по улучшению полного комплекса свойств конструкционных материалов достигнуты применением высокотемпературной термомеханической обработки винтовым обжатием (ВТМО ВО). При использовании данного вида обработки в технологическом процессе производства деталей машин и механизмов наблюдается одновременное повышение показателей прочностных, пластических и эксплуатационных свойств конструкционных сталей в среднем на 10–15 % [5]. На данный момент проведены обширные исследования данного процесса коллективом Института механики

УдмФИЦ УрО РАН, однако вопрос структурных превращений в сталях при данном виде обработки остается до конца не изученным. Исходя из этого основной целью данной работы является исследование влияния процесса ВТМО ВО на структуру стали 60С2ХФА.

Материалы и методы. В качестве заготовок для проведения исследований использовался круглый горячекатаный прокат из стали 60С2ХФА ГОСТ 14959-2016 с наружным диаметром 24 мм. Для исследования влияния процесса ВТМО ВО на структуру стали были подготовлены два образца по схеме, представленной на рисунке.

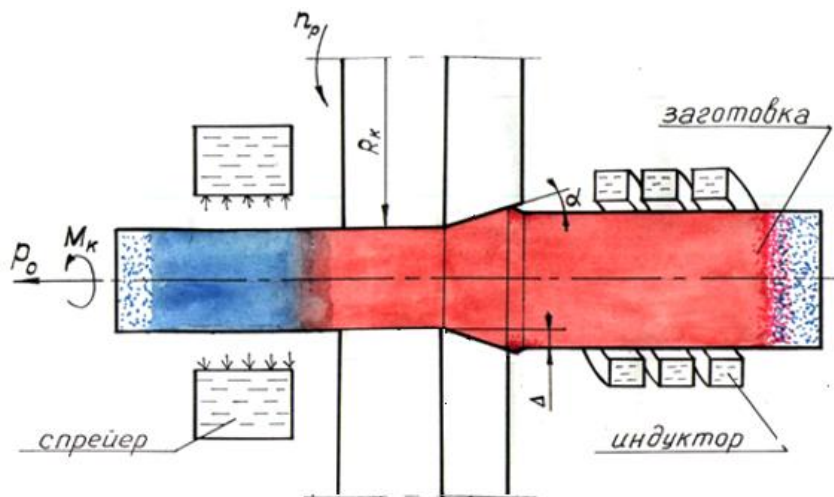


Схема получения образцов ВТМО ВО:

P_0 – усилие протяжки, Н; M_k – крутящий момент, Нм; n_p – частота вращения роликов, c^{-1} ;
 R_k – радиус калибрующей части ролика, м;
 Δ – разность радиусов исходной заготовки и калибрующей части роликов, м;
 α – угол конической части ролика, рад.

Режимы, по которым выполнялась ВТМО ВО, представлены в таблице.

Режимы ВТМО ВО

| № образца | $t_{\text{деф}}, ^\circ\text{C}$ | $\epsilon_{\text{обж}}, \%$ | $\beta', \text{град.}$ | Охлаждение |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------|
| 1 | 980 | 28 | 1,3 | + |
| 2 | 980 | 28 | 1,3 | - |

ВТМО ВО выполнялась на установке, описанной в [5]. Суть процесса заключалась в скоростном индукционном нагреве проката выше точки A_{c3} , деформации разнонаправленным силовым воздействием тремя неприводными роликами и охлаждении водой в спрейерном устройстве для образца № 1 и без охлаждения для образца № 2. После чего производилось охлаждение образцов на спокойном воздухе до температуры, близкой к окружающей среде. Затем прутки извлекались из клетки установки и разрезались на заготовки образцов для металлографических исследований. Для резки заготовок образцов использовался прецизионный отрезной станок с водяным охлаждением. Подготовка микрошлифов и металлографический анализ выполнялись в соответствии ГОСТ 5640-2020. Травление микрошлифов производилось 4 %-ным спиртовым раствором азотной кислоты. Исследования микроструктуры выполнялось на оптическом микроскопе Neophot-21. Исследование микроструктуры осуществлялось в соответствии с ГОСТ 5639-82, ГОСТ 8233-56.

Результаты исследований. В результате исследований было определено, что исходный образец обладает ферритно-перлитной структурой. Перлит в данном образце находится в мелкопластинчатом виде с межпластинчатым расстоянием 0,6–0,7 мкм. ВТМО ВО образца № 1 позволяет сформировать мартенситную структуру. Согласно ГОСТ 8233-56, по шкале 3 размер игл мартенсита соответствует баллу 2 (длина наибольших игл не превышает 2 мкм).

Обработка образца № 2, отличающаяся от образца № 1 отсутствием охлаждения в спрейерном устройстве, приводит к формированию сорбитной структуры.

Согласно методике, описанной в ГОСТ 5639-82, структура стали 60С2ХФА до ВТМО ВО обладает размером зерна, соответствующим 10 баллу по шкале 1, что в свою очередь соответствует среднему диаметру зерна 11 мкм. В процессе ВТМО ВО с охлаждением в спрейере (образец № 1) или без (образец № 2) происходит интенсивное измельчение зерна за счет воздействия разнонаправленных деформаций и закалки в напряженно-деформированном состоянии (для образца № 1), что приводит к уменьшению среднего размера зерна менее 1 мкм. Также это подтверждается исследованиями процесса ВТМО, представленными в [6], где описывается диспергирование структуры, изменение морфологии и фрагментация мартенсита, увеличение плотности дислокаций, что в свою очередь обеспечивает повышенную прочность и пластичность конструкционных сталей.

Заключение

В работе были проведены исследования микроструктуры образцов из стали 60С2ХФА до обработки и после ВТМО ВО с охлаждением (образец № 1) и без охлаждения (образец № 2) в спрейерном устройстве. Определено, что исходный образец обладал ферритно-перлитной структурой, образец № 1 – мартенситной и образец № 2 – сорбитной. Оба образца характеризуются малым средним размером зерна – менее 1 мкм. Также установлено, что закалка в процессе ВТМО ВО приводит к диспергированию структуры, изменению морфологии и фрагментации мартенсита, увеличению плотности дислокаций, что улучшает весь комплекс механических и эксплуатационных свойств сталей по сравнению со стандартной закалкой: временное сопротивление на 8–10 %, условный предел текучести на 7–9 %, относительное удлинение на 10–15 % и долговечность отдельных видов изделий – до двух раз.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование противоизносных свойств в восстановительных металломатричных композитах / А.Г. Ипатов, Е.В. Харанжевский, С.Н. Шмыков, А.В. Малинин // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 2 (78). – С. 134–140. – DOI: 10.48012/1817-5457_2024_2_134-140.
2. Поздеева, А.Ю. Материалы для пропитки пористых металлизационных газотермических антикоррозионных покрытий погружного нефтепромыслового оборудования. Часть 2 / А.Ю. Поздеева, А.П. Амосов, П.Е. Юдин // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, № 3. – С. 113–122. – DOI: 10.17122/ngdelo-2024-3-113-122.
3. Математическое моделирование диффузионного процесса в переходной зоне при получении биметаллических заготовок / В.Г. Суфиянов, С.Д. Соловьев, М.Ю. Стерхов, Д.А. Клюкин // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ИСОС'2020): сборник трудов Десятой всероссийской конференции, Ижевск, 17–19 марта 2020 года. – Ижевск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», 2020. – С. 300–308.
4. Особенности формования биметаллических материалов и изделий со спеченными вкладышами / П.А. Кузнецов, Р.В. Кузнецов, А.О. Просторова, В.П. Третьяков // Актуальные вопросы прочности: сборник тезисов LXIV Международной конференции, Екатеринбург, 04–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2022. – С. 344–345. – EDN RZGQQG.
5. Дементьев, В.Б. Новое поколение технологий, обеспечивающих раскрытие резервов существующих материалов на основе ВТМО винтовым обжатием / В.Б. Дементьев, А.М. Липанов // III Липановские научные чтения: материалы региональной школы-семинара молодых ученых, аспирантов и студентов, Ижевск, 13–14 июня 2024 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 2024. – С. 7–12.
6. Орлова, А.М. Определение механических свойств стали пружин рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов / А.М. Орлова, Е.А. Рудакова, А.В. Гусев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 3. – С. 370–376.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВ

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

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

Рассмотрено место среди композитов на полимерной основе и области применения фторопласта-4, обладающего высокими эксплуатационными характеристиками. Предложено металлофторопласты рассматривать как конструкцию, получаемую при компрессионной пропитке пористого фторопласта-4 расплавами металлов. Представлены результаты экспериментально-теоретического конструирования двухкомпонентных металлофторопластов. Установлено, что качество пропитки определяется исходной пористостью заготовки, размером пор, температурой пропитки, компрессионным давлением пропитки, временем пропитки и подогрева заготовки.

Ключевые слова: композит на полимерной основе, конструирование двухкомпонентных металлофторопластов, фторопласт-4

TECHNICAL PREREQUISITES FOR CREATING METAL-FLUOROPLASTS

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

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

This article considers fluoroplast-4, which has high performance characteristics, its place among polymer-based composites and its areas of application. It is proposed to consider metal-fluoroplasts as a structure obtained by compression impregnation of porous fluoroplast-4 with metal melts. The results of experimental and theoretical design of two-component metal-fluoroplasts are presented. It is established that the quality of impregnation is determined by the initial porosity of the workpiece, pore size, impregnation temperature, impregnation compression pressure, impregnation time and preheating of the workpiece.

Keywords: polymer-based composite, design of two-component metal-fluoroplasts, fluoroplast-4

Непрерывное развитие техники требует наличия определенных видов материалов, которые гарантированно обеспечивали бы надежность, долговечность и работоспособность изделий в различных эксплуатационных условиях. Среди всего многообразия материалов большое распространение получили композиты на полимерной основе. Использование полимеров позволило сократить потребление металлов и создать узлы и изделия с необходимыми повышенными эксплуатационными свойствами, а также с эстетическим дизайном, что играет немаловажную роль в нынешних рыночных отношениях.

Наибольшее распространение и особое место среди полимеров нашел фторопласт-4. Пристальному вниманию исследователей и эксплуатационников фторопласт-4 обязан химической и биологической стойкостью, высокими антифрикционными характеристиками, возможностью использования в диапазоне температур от -269 до +260 °С при наличии глубокого вакуума и других критических условиях эксплуатации [1]. Металлофторопласты в основном нашли применение в антифрикционных узлах в качестве подшипников скольжения, так как обладают высокой конструкционной прочностью, жесткостью, способностью противостоять вибрационным нагрузкам. Эти качества металлофторопластов позволяют их

использовать в тяжело нагруженных и ответственных узлах трения машин и механизмов различного функционального назначения.

В экстремальных условиях наиболее перспективным является использование металлофторопластов с взаимопроникающей структурой, которая получается при компрессионной пропитке пористого фторопласта-4 расплавами металлов, температура плавления которых не превышает температуру деструкции фторопласта-4 [1].

Структура таких металлофторопластов является новой и ее предлагается рассматривать как конструкцию из нескольких различных по своим характеристикам материалов, а процесс их создания считать конструированием [2]. Поэтому алгоритм создания металлофторопластов будет включать два этапа: расчетно-аналитический и экспериментально-технологический. На первом этапе необходимо произвести анализ морфологии композита, осуществить выбор способа конструирования, а на базе имеющихся в механике композитов теорий и расчетных зависимостей построить физическую и математическую модели структуры, которые позволяют прогнозировать свойства полученных материалов. Второй этап необходим для реализации приведенных моделей в действительную конструкцию металлофторопласта.

Однако несовершенство расчетного аппарата, связывающего свойства композитов с объемным соотношением составляющих ингредиентов и их взаимным расположением, а также недостаток данных об этом в технической литературе требуют дополнительных исследований.

В данной работе представлены результаты экспериментально-теоретического конструирования двухкомпонентных металлофторопластов с целью подтверждения теоретических предпосылок при изготовлении поликомпонентных металлофторопластов. Для изготовления двухкомпонентных металлофторопластов использовались пористые фторопластовые заготовки, для которых экспериментально было установлено, что размер сообщающихся пор соизмерим с частицами полимера после его размолва и последующего рассеивания, т. е. примерно 20 мкм, а максимальная пористость заготовок, получаемых прямым прессованием, не превышает 32 %.

С учетом результатов предварительных исследований и предположений, что все поры являются сообщающимися, структурное строение пористой фторопластовой заготовки представляется в виде прямоугольной трехплоскостной или гексагональной трансверсально-изотропной структуры пространственно-армированного композита [2].

При отработке технологических режимов компрессионной пропитки использовали серийный пористый фторопласт-4, изготовленный из предварительно термообработанного полимера [3]. Исходная пористость находилась в тех же пределах, что и у образцов, изготовленных прямым прессованием. Отличие состояло в размерах пор, величина которых находилась в пределах 0,14–0,20 мм. С целью определения температурных режимов пропитки был выполнен комплекс постановочных экспериментов. Осуществлялась пропитка сырого фторопласта-4 с насыпной плотностью 0,8 г/см³, что соответствует пористости 64–65 %. В качестве армируемых матриц использовались серебристый графит, медный и бронзовый порошки, дисульфид молибдена с дисперсностью частиц около 0,014 мм и выше, а армирующих сплавов – баббит Б-83 (ГОСТ 1320-74), припой ПОС-50 (ГОСТ 21930-76) и ПОСК-18 (ГОСТ 21931-76).

Результаты исследований показали, что качественное заполнение пор металла происходит у меди, бронзы, дисульфида молибдена с дисперсностью частиц более 0,014 мм. Серебристый графит и неспеченный фторопласт-4 не пропитались, так как отсутствовал жесткий каркас, который способствует проникновению жидкого металла в поры. Дисульфид молибдена с дисперсностью частиц менее 0,014 мм не пропитался ввиду малых размеров пор. Критической температурой, при которой можно осуществлять компрессионную пропитку фторопластовой матрицы расплавами металлов, является температура плавления кристаллов полимера, т. е. +327 °С. При превышении указанной температуры происходит оплавление фторопласта-4 и закрытие пор, а заготовка подвергается всестороннему гидростатическому

сжатию до монолитного состояния. Можно сказать, что деформация пористого фторопласта-4 в процессе компрессионной пропитки происходит за счет уменьшения поперечного сечения сообщающихся пор. При проникновении металла в пористом теле возникают несколько видов сопротивлений: капиллярное за счет несмачивания фторопласта-4 расплавами металлов; сопротивление воздуха, сжимаемого внутри сообщающихся пор; прочности полимерного каркаса – σ_k . Компрессионное давление должно компенсировать весь комплекс перечисленных факторов.

Прочность фторопласта-4 зависит от температуры t и достаточно точно описывается в диапазоне температур от 19 до 300 °С следующей зависимостью [3]:

$$\lg \sigma_k = 0,53166 + 48,864/t. \quad (1)$$

При компрессионной пропитке происходит всестороннее гидростатическое прессование, в результате которого происходит дополнительное увеличение противодействия воздуха в порах заготовки. Приняв воздух за идеальный газ и воспользовавшись уравнением Клапейрона – Менделеева, можно рассчитать противодействие в порах полимерной заготовки для диапазона температур от 260 до 320 °С. Капиллярное сопротивление за счет несмачиваемости определяется как

$$P_k = 4\sigma/r, \quad (2)$$

где σ – поверхностное натяжение расплава металла, Н/м;
 r – радиус капилляра, м.

Противодействие воздуха в порах возрастает за счет несмачиваемости и объемной деформации заготовки. Расчеты показали, что величина противодействия воздуха в замкнутых порах возрастает до 3,3 МПа без учета деформации.

Время пропитки определяется аналитически:

$$\tau = V_m/Q, \quad (3)$$

где V_m – объем армирующего сплава, м³;
 Q – объемный расход расплава металла, м³/с.
 Объемный расход металла находится по зависимости

$$Q = [(P_\tau - P_0)/(\eta \cdot l)] \cdot K \cdot F_\phi, \quad (4)$$

где P_τ – компрессионное давление пропитки, Па;
 P_0 – атмосферное давление, Па;
 η – вязкость расплава металла при компрессионном давлении пропитки, Па·с;
 l – длина порового канала, м;
 K – коэффициент проницаемости пористой матрицы, м²;
 F_ϕ – площадь фильтрующей поверхности пористой матрицы, м².

Вязкость расплава металла изменяется с увеличением температуры и внешнего давления следующим образом:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{P_\tau \cdot V_0 / R \cdot T}, \quad (5)$$

где η_0 – вязкость расплава при атмосферном давлении и температуре пропитки T_τ , Па·с;
 V_0 – объем расплава металла при атмосферном давлении, м³;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/кг;
 T – температура расплава, К.

С учетом вышеизложенного объемный расход армирующего сплава составит

$$Q = [(P_{\tau} - P_0) / (\eta_0 \cdot e^{P_{\tau} \cdot V_0 / R \cdot T} l)] \cdot K \cdot F_{\Phi}. \quad (6)$$

Для осуществления качественной пропитки фторопластовой матрицы необходим предварительный прогрев заготовки. Время прогрева определялось из условия равенства тепла, необходимого для нагрева образца до заданной температуры, условно проходящего через плоскую стенку толщиной l :

$$\tau_{\text{пр}} = (m_1 C_1 + m_2 C_2) \cdot l / (\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2), \quad (7)$$

где m_1 – масса фторопластового образца, кг;

m_2 – масса воздуха в пористом образце, кг;

C_1 – удельная теплоемкость фторопласта-4, Дж/кг;

C_2 – удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг;

λ_1 – коэффициент теплопроводности фторопласта-4, (Вт/м)·град;

λ_2 – коэффициент теплопроводности воздуха, (Вт/м)·град;

S_1 – площадь фторопластовой заготовки, перпендикулярной тепловому потоку, м²;

S_2 – площадь поверхности воздуха, заполняющего поры, м².

Расчеты показали, что время прогрева одной заготовки составляет пять минут.

Таким образом, установлено, что качество пропитки определяется следующими факторами: исходной пористостью заготовки P , %; размером пор H , мм; температурой пропитки, характеризующей вязкость расплава T , °С; компрессионным давлением пропитки P_{τ} , МПа; временем пропитки τ , мин; временем подогрева заготовки $\tau_{\text{пр}}$, мин.

Результаты выполненных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Применение теории пористых тел для полимерных материалов позволило создать физико-математическую модель металлофторопластов, согласно которой научно обосновано и экспериментально подтверждено поведение фторопласта-4 как пластичного материала, что позволяет использовать прикладную теорию пластичности пористых тел и теорию обработки давлением при аналитическо-экспериментальном конструировании металлофторопластов.


2. Для фторопластовых композитов определены аналитические зависимости характеристик от технологических параметров изготовления.

3. Определены возможности значительного сокращения цикла конструкторско-технологической подготовки производства изделий из металлофторопластов с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лагунов, В.С. Композиционные тонкослойные материалы на основе фторопласта-4: монография / В.С. Лагунов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992. – 138 с.
2. Шишков, С.В. Модель деформации металлопластового полосового материала / С.В. Шишков, Ю.Л. Бобаркин, А.М. Урбанович // Вест. Гомельского гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2016. – № 4. – С. 52–57.
3. Корнопольцев, В.Н. Листовые металлопластовые материалы с заданными эксплуатационными свойствами / В.Н. Корнопольцев, А.М. Гурьев // Обработка металлов. – 2011. – № 3 (52). – С. 43–46.

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ОГНЕУПОРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМ К ЛИТЬЮ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СРЕДСТВАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА


Гусев О.Н., директор НОЦ «Перспективные материалы»,
Никитин К.В. , заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: kvn-6411@mail.ru

Представлены результаты исследований физических и технологических свойств филаментов из полимерных материалов, которые используются в аддитивном производстве моделей по FDM-технологии. Показано, что наиболее важными свойствами являются зольный остаток A, технологическая усадка при полимеризации, коэффициент теплового линейного расширения α_L . Обоснованный выбор материала и технологии изготовления выплавляемых (выжигаемых) моделей позволяет обеспечить эффективную интеграцию аддитивных технологий и литейного производства изделий, получаемых способом литья по выплавляемым (выжигаемым) моделям.

Ключевые слова: аддитивные технологии, литье по выплавляемым моделям, огнеупорная керамическая форма

FEATURES OF PREPARATION OF REFRACTORY CERAMIC MOLDS FOR CASTING USING MODELS, OBTAINED BY MEANS OF ADDITIVE MANUFACTURING

Gusev O.N., Director of the scientific and educational center “Perspective Materials”,
Nikitin K.V. , Head of the Department, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: kvn-6411@mail.ru

The results of studies of the physical and technological properties of filaments made of polymer materials used in the additive manufacturing of models using FDM technology are presented. It is shown that the most important properties are the ash residue A, the technological shrinkage during polymerization, and the coefficient of thermal linear expansion α_L . A reasonable choice of material and manufacturing technology for the smelted (burnt) models allows for effective integration of additive technologies and foundry production of products obtained by casting from smelted (burnt) models.

Keywords: additive technologies, die casting, refractory ceramic mold

Введение

В мировой практике для получения отливок с высокой размерной точностью, как правило, применяют такие специальные способы литья, как литье под давлением и в кокиль, литье по газифицируемым и выплавляемым моделям [1].

При литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) обеспечиваются высокие размерная, геометрическую точность (до 4–5 класса) и чистота поверхности (шероховатость по R_z до 10 и R_a до 1,25 мкм) отливок [2]. Однако традиционный технологический процесс ЛВМ характеризуется высокими трудоемкостью, материалоемкостью и временными затратами на подготовку производства, что обуславливает изготовление всего 1,5 % отливок, получаемых способом ЛВМ, в общей доле отливок в машиностроении.

Основные задачи, которые необходимо решить для повышения эффективности литейного производства были сформулированы в известной парадигме выдающегося

ученого-литейщика Б.Б. Гуляева еще в конце XX века: «Как получить расплав и отливку заданного качества при минимальных затратах материалов, энергии, труда и минимальном загрязнении среды» [3].

Повышение эффективности указанного способа литья возможно за счет интеграции технологий аддитивного производства (АП) и традиционного процесса ЛВМ на подготовительных этапах. Данное направление в полной мере соответствует направлениям Стратегии научно-технологического развития РФ до 2035 г. (п. 20, п/п «а») и Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 г. (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 г. № 1913-р) [4–5]. Особую актуальность интеграция аддитивных технологий и литейного производства приобретает на этапе изготовления моделей и модельных комплектов в условиях опытного или мелкосерийного производств отливок способом ЛВМ [6].

Одним из наиболее важных аспектов при интеграции двух производственных процессов являются закономерности взаимодействия в замкнутой системе «огнеупорная керамическая форма – полимерная модель» на этапе удаления модельного блока из огнеупорной керамической формы.

Результаты исследований. В сопроводительной документации к полимерным филаментам, используемым в аддитивном производстве по FDM-технологии, зачастую не приводятся параметры физических и технологических свойств, которые необходимо учитывать при интеграции аддитивных технологий (АТ) и литейного производства (табл. 1).

Таблица 1

Паспортные свойства полимерных филаментов для FDM-технологии

| Марка | Температура экструзии, °С | Температура размягчения, °С | Линейная усадка, % | Прочность на изгиб, МПа | Прочность на растяжение, МПа | Плотность, г/см ³ |
|-------|---------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
| PLA | 200–220 | 50 | 0,2–0,5 | 94,2 | 34,8 | 1,25 |
| PMMA | 225–245 | 113 | Не указано | 110 | 72 | 1,18 |
| HIPS | 220–235 | 96 | Не указано | 37,6 | 16,4 | 1,03 |
| ABS | 240–270 | 103 | 0,8–1,2 | 65,4 | 29,6 | 1,05 |
| SBS | 225–245 | Не указано | Не указано | 3,4 | 19,7 | 0,95 |

К числу наиболее важных с точки зрения литейного производства физических и технологических свойств полимерных филаментов относятся зольный остаток A (%), технологическая усадка при полимеризации (α_n , %) и коэффициент теплового линейного расширения (КТЛР, α_L).

Было установлено, что параметры A и α_L зависят от объемного заполнения модели K_0 (%); α_n зависит от температуры экструзии $T_{эк}$ (°С) и плотности заполнения модели K_0 при печати. В качестве примера на рис. 1–3 представлены результаты исследований.

Из рис. 1 видно, что минимальными значениями зольного остатка в исследуемом диапазоне плотности заполнения характеризуется полимер на основе PMMA ($\leq 0,05$ %). Во всем исследуемом диапазоне плотности заполнения величина зольного остатка не превышает значения зольности известных восковых модельных составов для литья по выплавляемым моделям. Полимер на основе PLA имеет зольный остаток в диапазоне 0,19–0,25 % при плотности заполнения 5–15 %. Это позволяет прогнозировать минимизацию дефектов в виде газовых раковин, спаев и недоливов при использовании моделей, полученных средствами АП из полимеров на основе полилактида в заданном интервале плотности заполнения.

Из рис. 2 видно, что с увеличением рабочих температур экструзии, характерных для каждого полимера, увеличивается и технологическая усадка моделей. Это означает, что наименьшими изменениями линейных размеров после окончания печати будут характеризоваться образцы, экструдированные из PLA в интервале рабочих температур 200–220 °С; максимальными – из ABS в интервале рабочих температур 240–270 °С.

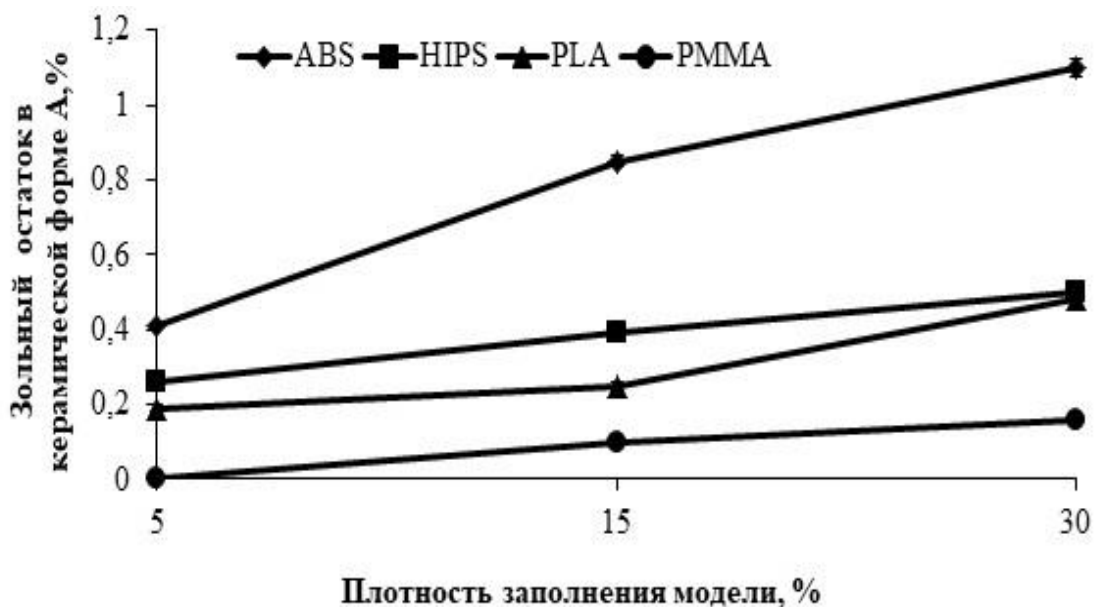


Рис. 1. Влияние вида полимерного материала и плотности заполнения моделей, полученных по FDM-технологии, на величину зольного остатка

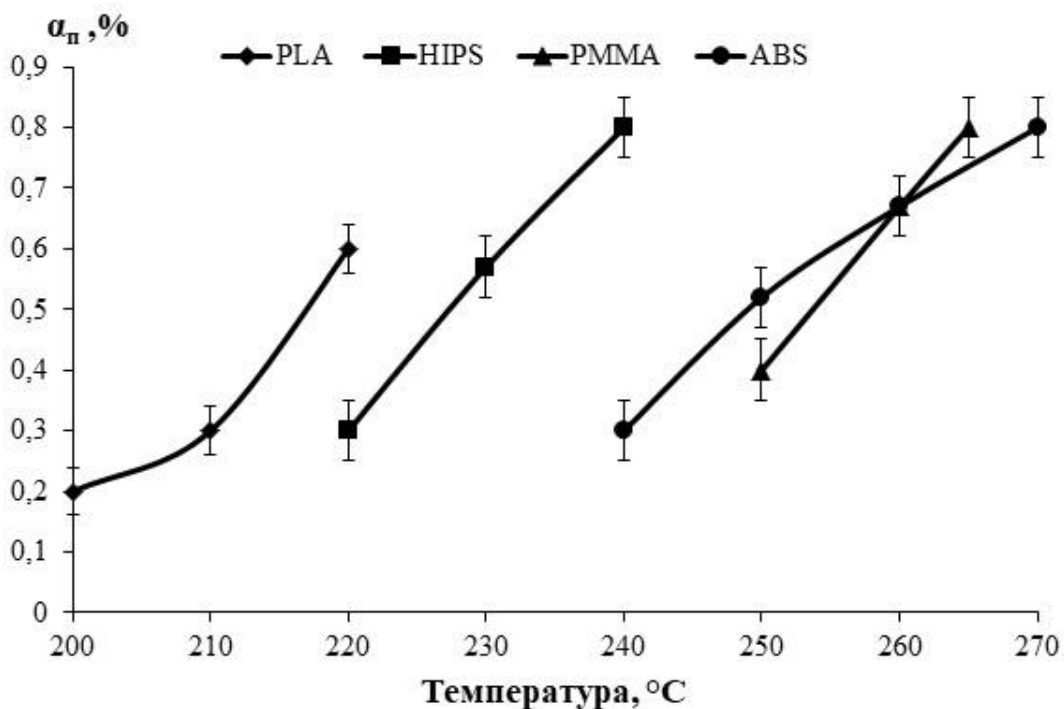


Рис. 2. Влияние температуры экструзии полимерных материалов на технологическую усадку моделей, полученных по FDM-технологии

Дальнейшие эксперименты по влиянию параметра K_0 на α_n и α_L показали, что по совокупности результатов наиболее технологичным является filament на основе PLA для изготовления выжигаемых моделей при литье в огнеупорные керамические формы.

На основании результатов исследований была разработана технология выжигания модельного блока из огнеупорной керамической формы (ОКФ), изготовленной из плавненого кварца, с обеспечением ее целостности (табл. 2).

Температурные режимы совмещенного процесса удаления моделей и проковки ОКФ

| № этапа | Температурный интервал*, °С | Процесс |
|---------|-----------------------------|---|
| 1 | 80–120 | Термостабилизационный нагрев |
| 2 | 260–310 | Извлечение массовой доли полимерной модели, исключая процессы открытого горения |
| 3 | 580–650 | Выжиг остаточной доли полимерного материала |

* Меньшие значения используются на малогабаритных моделях с простой геометрией, большие значения – на крупногабаритных фасонных моделях

Для опытного, штучного и мелкосерийного производств невозможно применить какой-то универсальный технологический прием при интеграции технологий АП и стандартного процесса литья по выплавляемым (выжигаемым) моделям. В зависимости от габаритов и геометрической сложности модели отливок возможны следующие варианты, включающие элементы технологий АП: модели ЛПС и отливки изготовлены по технологии 3D-печати из полимеров; модели отливки изготовлены по технологии 3D-печати из полимеров, а модели элементов литниково-питающих систем – из восковых составов по серийной технологии.

При использовании новых марок полимеров для изготовления модельных блоков средствами аддитивного производства или комбинированных модельных блоков необходимо проводить предварительные исследования вышеперечисленных физических и технологических свойств для определения оптимальных температурно-временных режимов подготовки ОКФ к литью.



Рис. 3. Растрескивание огнеупорной керамической формы в процессе удаления комбинированного модельного блока

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты по удалению комбинированного модельного блока из огнеупорной керамической формы, полученной на водном связующем с огнеупорным наполнителем в виде электрокорунда. Модель отливки «Лопатка» была получена средствами АП по SLA-технологии из фотополимера Jewelry J-Cast, а литниковая

система из воскового состава марки КПЦ по серийной технологии – запрессовкой в металлическую пресс-форму. Растрескивание ОКФ началось в зоне замковой части формообразующей фотополимерной модели «Лопатка», к которой посредством напайки были присоединены элементы литниково-питающей системы. Причем растрескивание началось при температуре в атмосфере прокалочной печи 90–100 °С. Предварительный анализ результатов эксперимента показал, что при выборе режимов удаления комбинированного модельного блока не были учтены коэффициенты теплового линейного расширения материалов комбинированного модельного блока и огнеупорной керамической формы. В процессе нагревания материалы комбинированного модельного блока стали расширяться быстрее, чем материал ОКФ, что привело к возникновению дополнительных давлений на стенки формы.

Заключение

Интеграция аддитивных технологий и стандартного процесса литья по выплавляемым моделям позволяет существенно повысить вариативность процесса, сократить сроки подготовки производства, снизить себестоимость литых изделий за счет исключения из технологического цикла изготовления пресс-форм для получения моделей. Наиболее целесообразно использовать данный подход в опытном, штучном и мелкосерийном производстве. При этом на первых этапах необходимо правильно выбрать материал и способ изготовления моделей и модельных блоков средствами аддитивного производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ефимов, В.А. Специальные способы литья: справочник / В.А. Ефимов. – М.: Машиностроение, 1991. – 734 с.
2. Литье по выплавляемым моделям / В.Н. Иванов, С.А. Казеннов, Б.С. Курчман [и др.]; под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
3. Гуляев, Б.Б. Решенные и нерешенные задачи теории литейных процессов / Б.Б. Гуляев // Литейное производство. – 1990. – № 9. – С. 2–3.
4. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации // Указ Президента РФ № 642 от 01.12.2016 г.
5. Стратегия развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года // Распоряжение Правительства РФ № 1913-р от 14.07.2021 г.
6. Баринов, А.Ю. Применение быстрого прототипирования для получения единичных и мелкосерийных отливок литьем по выплавляемым моделям / А.Ю. Баринов, К.В. Никитин, В.Н. Дьячков // Литейное производство. – 2017. – № 3. – С. 123–127.

МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ НАПОЛНИТЕЛЯ КОМПОЗИТНОГО ПОКРЫТИЯ ОТ ПЛОТНОСТИ ЧАСТИЦ SiC В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

Жачкин С.Ю., д.т.н., профессор, преподаватель,
Трифонов Г.И., к.т.н., старший научный сотрудник

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: i@gtrifonov.ru*

Представлены ключевые результаты исследований, направленных на изучение взаимосвязи между плотностью наполнителя композитного покрытия и плотностью частиц SiC в электролите при их электролитическом осаждении. Разработана математическая модель, которая позволяет описать особенности этой зависимости. Полученные уравнения могут послужить основой для создания электролитических композитных покрытий с дисперсионным упрочнением, обладающих повышенной износостойкостью.

Ключевые слова: композитное покрытие, плотность наполнителя, электролит, карбид кремния, осаждение

A MODEL OF THE DEPENDENCE OF THE FILLER DENSITY OF A COMPOSITE COATING ON THE DENSITY OF SiC PARTICLES IN AN ELECTROLYTE

Zhachkin S.Yu., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, teacher,
Trifonov G.I., PhD in Engineering Sciences, senior researcher

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russian Federation
E-mail: i@gtrifonov.ru*

The paper presents the key results of research aimed at studying the relationship between the density of composite coating filler and the density of SiC particles in the electrolyte during their electrolytic deposition. A mathematical model has been developed that allows us to describe the features of this dependence. The obtained equations can serve as a basis for creating electrolytic composite coatings with dispersion hardening, which have increased wear resistance.

Keywords: composite coating, filler density, electrolyte, silicon carbide, precipitation

В настоящее время в контексте программы импортозамещения в сфере восстановления техники технология электролитического осаждения защитных покрытий активно используется в производственных процессах промышленных предприятий. Так, с возрастанием доступности к применению технологии электролитического осаждения возрос интерес и к использованию в данном процессе наночастиц.

Для формирования композитных покрытий с применением наночастиц требуется решить ряд задач: обеспечить достаточное количество частиц в покрытии и предотвратить их агрегацию в растворах для нанесения. При решении данных задач в результате будут получаться покрытия, содержащие частицы микронного размера, которые обладают высокой износостойкостью и находят применение, например, в автомобильных двигателях [1–4].

В работе [3] при проведении экспериментальных исследований авторами был детально изучен и описан процесс влияния размера и количества частиц, находящихся в электролите для покрытия, на количество наночастиц наполнителя.

На рис. 1 представлен график, демонстрирующий зависимость объёмного содержания частиц наполнителя – SiC – в композитном покрытии от концентрации и размеров частиц

SiC в электролите. Из графика следует, что в рамках исследования были рассмотрены три типа частиц SiC и что объёмный процент осаждённого SiC возрастает пропорционально увеличению количества частиц SiC в электролите [5–8].

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости плотности наполнителя в композитном покрытии от плотности частиц в электролите. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что происходит скачкообразное изменение плотности частиц наполнителя при постоянном значении плотности частиц в электролите. Это свидетельствует о том, что эффективность осаждения значительно возрастает с уменьшением размера частиц осаждаемого вещества.

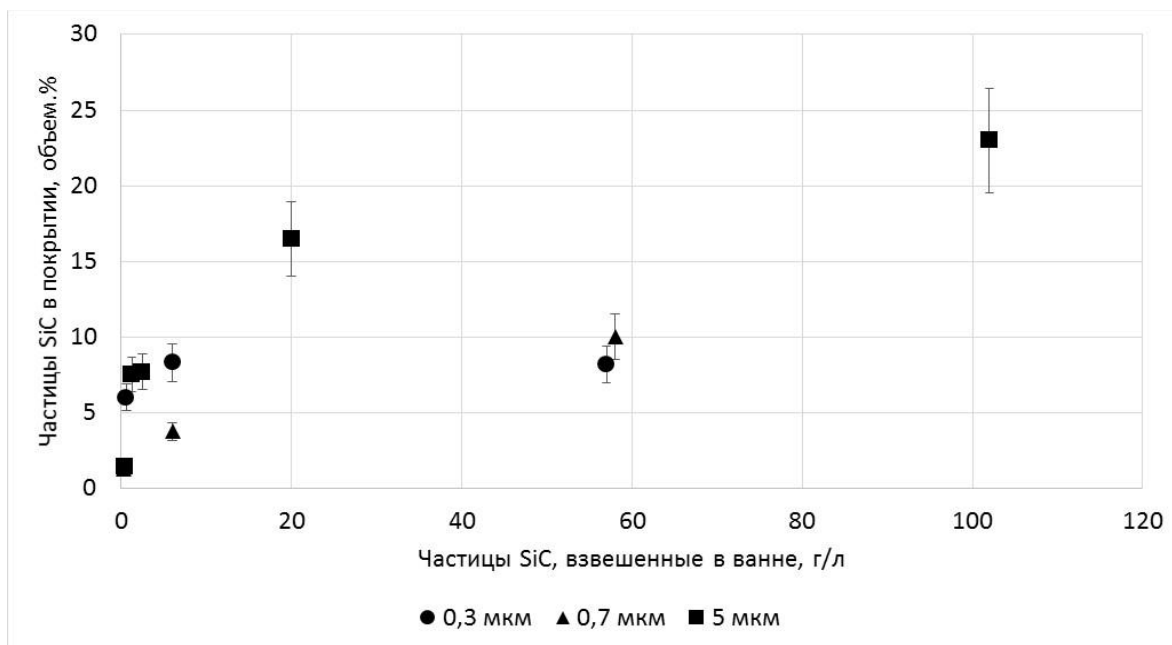


Рис. 1. График зависимости частиц SiC

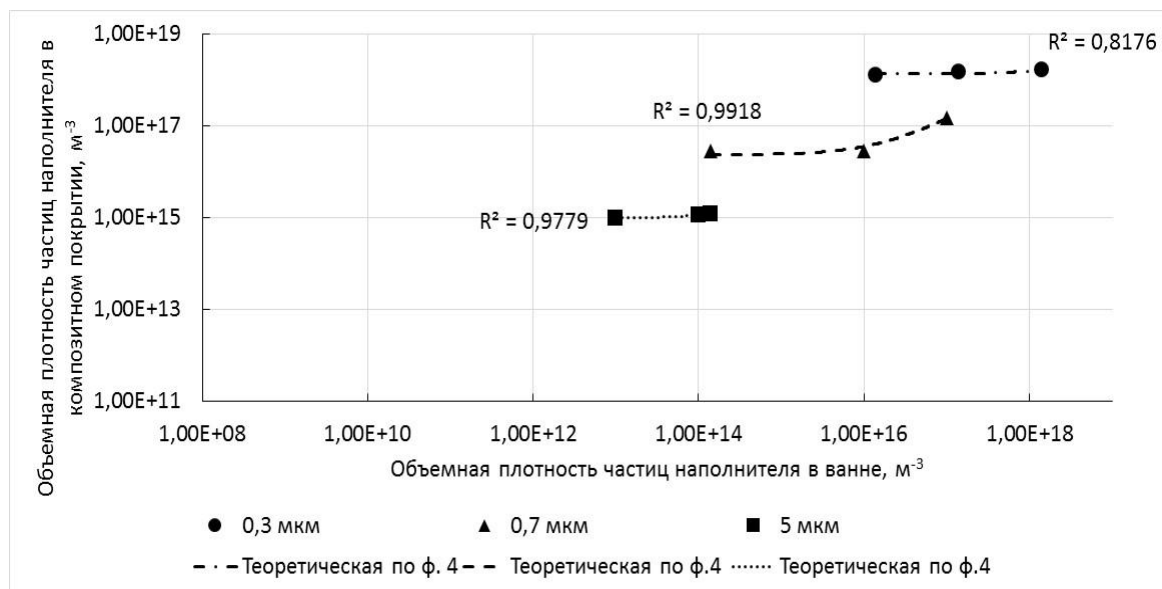


Рис. 2. Корреляция между плотностью наполнителя в композитном покрытии и плотностью частиц в электролите

В ходе экспериментов были задействованы частицы SiC различного размера, и это обстоятельство необходимо принимать во внимание, поскольку при их осаждении они обладали различной поверхностной химией. В связи с этим результаты, представленные

на рис. 2, могли быть обусловлены как различиями в поверхностной химии, так и размерными зависимостями.

На основании результатов проведённых экспериментов и сделанных на их основе выводов [3, 9] была создана модель, описывающая зависимость плотности наполнителя композитного покрытия от плотности частиц карбида кремния (SiC) в электролите. Эта модель позволяет объяснить размерные эффекты, возникающие при использовании наночастиц, а также особенности их осаждения.

В процессе моделирования за основу была взята зависимость, которая описывает пропорциональную связь между плотностью наночастиц, осаждённых в покрытии, на единицу объёма n_c , и количеством частиц, формирующихся в покрытии за единицу времени n_s^* . Эта зависимость выражается через соотношение между количеством частиц и изменением объёма ΔV покрытия за единицу времени:

$$n_c = \frac{n_s^*}{\Delta V}. \quad (1)$$

Увеличение объёма происходит в соответствии с законом Фарадея, при этом учитывается вклад осаждённых частиц, которые предполагаются монодисперсными и сферическими:

$$\Delta V = \frac{M i}{n \rho F} + \frac{\pi}{6} d^3 n_s^*, \quad (2)$$

где F – постоянная Фарадея, кл/моль⁻¹;

n – валентность ионов металла;

M и ρ – атомная масса и плотность металла, кг/м³;

i – плотность тока, А/м²;

d – диаметр осаждённых частиц, м.

Число частиц, закрепляемых в покрытии n_s^* , может быть выражено через плотность частиц в электролите n_s с использованием коэффициента передачи A и вероятности P :

$$n_s^* = P A n_s, \quad (3)$$

где A – общий объём частиц, которые сталкиваются с электродом за единицу времени, м³;

P – вероятность того, что частицы останутся на поверхности покрытия и будут включены в катодное осаждение.

Данный коэффициент передачи A и вероятность P , несомненно, находятся в зависимости от процессов перемешивания ванны и гидродинамических характеристик. Подставив ΔV и n_s^* в уравнение (1), можно определить плотность осаждённых частиц.

$$n_c = \frac{P A n_s}{\frac{M i}{n \rho F} + \frac{\pi}{6} d^3 P A n_s}. \quad (4)$$

В уравнении (4) присутствует лишь один зависимый параметр – PA , который устанавливает корреляцию между числом частиц, достигающих катода (A), и вероятностью того, что эти частицы останутся на катоде (P).

Тот факт, что наши результаты соответствуют уравнению (4) с одним значением для PA , что иллюстрирует рис. 2, указывает на то, что эффект связан с размером частиц, а не с изменением химии поверхности. Экстраполируя уравнение (4) на частицы SiC размером 0,1 мкм, можно видеть, что плотность осаждённых частиц в покрытии будет более чем на два порядка больше, чем для частиц размером 0,7 мкм. Это открывает интересные перспективы для достижения дисперсионного упрочнения в электролитических композиционных покрытиях, которые будут иметь улучшенные износостойкие свойства.

Уравнение (4) сопоставимо с результатами исследования [2] и соответствуют с одним значением для параметра PA , что наглядно демонстрирует рис. 2. Это указывает на то, что эффект связан с размером частиц, а не с изменением их химического состава. Это открывает новые перспективы для достижения дисперсионного упрочнения в электролитических композиционных покрытиях, которые будут обладать повышенной износостойкостью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Electrochemical Deposition of Composite Nickel–Graphene Oxide Coatings in the Reverse Mode / V.N. Tseluykin, S.M. Zakirova, A.S. Mostovoy [et al.] // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2022. – Vol. 58, No. 2. – Pp. 321–324. – DOI: 10.1134/S2070205122020198.
2. Electrodeposition and corrosion properties of nickel–graphene oxide composite coatings / V. Tseluikin, A. Dzhumieva, A. Yakovlev [et al.] // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 19. – DOI: 10.3390/ma14195624.
3. Жачкин, С.Ю. Износостойкость никелевых композиционных покрытий с микронными и субмикронными частицами SiC / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, О.А. Сидоркин, А.В. Пустоветов // *Инженерные технологии и системы*. – 2024. – Т. 34, № 4. – С. 631–649. – DOI: 10.15507/2658-4123.034.202404.000-000.
4. Новиков, В.Ю. О механизме формирования микроструктуры при вторичной рекристаллизации в материале с дисперсными частицами второй фазы / В.Ю. Новиков // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2022. – № 1 (799). – С. 9–15.
5. Массоперенос при гальваническом осаждении покрытий с выравнивающей добавкой / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Ю.А. Невструев [и др.] // *Наука в центральной России*. – 2022. № 2 (56). – С. 134–142. – DOI: 10.35887/2305-2538-2022-2-134-142.
6. Пластическая твердость композиционных покрытий на основе хрома / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, О.А. Сидоркин, А.В. Пустоветов // *Технический сервис машин*. – 2024. – Т. 62, № 1 (154). – С. 94–100. – DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-1-94-100.
7. Оксидное волокно с покрытием карбида кремния для создания композиционных материалов / В.Г. Бабашов, Н.М. Варрик, В.Г. Максимов, О.Н. Самородова // *Авиационные материалы и технологии*. – 2021. – № 3 (64). – С. 94–104. – DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104.
8. Слепцова, Е.Р. Повышение коррозионной стойкости карбида кремния методом нанесения защитных покрытий / Е.Р. Слепцова, П.С. Джумаев, Р.Ш. Исаев // *Физика конденсированных состояний: сборник тезисов III Международной конференции, посвященной 60-летию ИФТТ РАН, Черногловка, 29 мая – 2 июня 2023 года* / Под ред. Б.Б. Страумала. – Черногловка: Институт физики твердого тела РАН, 2023. – С. 64. – DOI: 10.26201/ISSP.2023/FKS-3.61.
9. Бирюков, В.П. Влияние упрочняющей фазы на механические и триботехнические характеристики покрытий, полученных лазерной наплавкой / В.П. Бирюков // *Трибология – машиностроению: труды XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова, Москва, 12–14 октября 2022 года*. – М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук, 2022. – С. 46–49.

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРМЕТОВ TiC-Cu СОЧЕТАНИЕМ МЕТОДОВ СВС И МЕТАЛЛОТЕРМИИ

Каракич Е.А., аспирант, **Умеров Э.Р.**, к.т.н., ведущий научный сотрудник,
Новиков В.А., к.т.н., доцент, **Амосов А.П.**, д.ф.-м.н., профессор

*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: maximcaracki4@gmail.com*

В последнее время наблюдается рост популярности керамико-металлических композитов (керметов) системы TiC-Cu. В традиционных методах получения таких композитов частицы TiC либо спекаются с порошком меди, либо вводятся в медный расплав. В данной работе рассматривается новый подход, при котором керметы TiC-Cu синтезировались путем сочетания термитной реакции для получения расплава меди с последующей инфильтрацией пористой керамики (TiC), полученной методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) на воздухе без использования реактора. В работе представлены данные о структуре полученных композитов, их плотности и твердости.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, металлотермия, медь, карбид титана, кермет, инфильтрация

FABRICATION OF TiC-Cu CERMETS BY A COMBINATION OF SHS AND METALLOTHERMY METHODS

Karakich E.A., PhD student, **Umerov E.R.**, PhD in Engineering Sciences, lead researcher,
Novikov V.A., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Amosov A.P., Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor

*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
E-mail: maximcaracki4@gmail.com*

Recently, there has been a growing popularity of ceramic-metal composites (cermets) of the TiC-Cu system. In traditional methods for producing such composites, TiC particles are either sintered with copper powder or introduced into a copper melt. In this paper, a new approach is considered in which TiC-Cu cermets were synthesized by combining a thermite reaction to produce a copper melt, followed by infiltration of porous ceramics (TiC) obtained by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in air without using a reactor. The paper presents data on the structure of the obtained composites, their density and hardness.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, metallothemy, copper, titanium carbide, cermet, infiltration

Введение

Керметы системы «карбид титана – медь» обладают привлекательным сочетанием высокой тепло- и электропроводности благодаря меди, а также высокой твердости, прочности и стойкости к окислению за счет присутствия TiC. К популярным методам получения композиционных материалов системы TiC-Cu можно отнести методы порошковой металлургии: традиционное и микроволновое спекание, электроискровое спекание, горячее прессование. Однако для снижения остаточной пористости получаемых композитов, как правило, необходимо приложение высокого давления и воздействия температуры, при которых достигается достаточное уплотнение исходных порошковых материалов.

Методы свободной или самопроизвольной инфильтрации жидкого металла в пористую керамическую заготовку не нуждаются в приложении избыточного давления, что делает их

привлекательными для изготовления композитов с различным соотношением «металл – керамика» благодаря технологичности, низкой энерго- и трудоемкости. Основным препятствием для изготовления таких композитов является плохое смачивание TiC нереакционноспособными жидкими металлами, такими как Cu.

За последние годы поведение при смачивании в системе TiC/Cu было предметом нескольких исследований [1–4]. Еременко в своей ранней работе [1] и более поздних исследованиях [2–4] сообщал, что нереакционноспособные жидкие металлы, такие как Cu и Ag, не смачивают стехиометрический TiC и образует высокие углы контакта – 120°. Добавление титана в расплав и/или использование гипостехиометрического карбида титана с низким содержанием углерода или значительным превышением содержания титана существенно улучшает смачивание карбидной подложки жидким Cu [2]. Смачивание частиц TiC расплавом меди также влияет на адгезию между металлом и керамикой, что определяет уровень физико-механических свойств композитов Cu-TiC. Контактный угол смачивания в системе Cu-TiC существенно зависит от температуры и времени, и, например, при 1200 °C снижается с 130 до 90 °C в течение 25 минут [5]. Понижение температуры увеличивает угол смачивания, кроме того, даже небольшое окисление поверхности TiC значительно ухудшает смачивание расплавом меди, так как полностью ингибируются реакции частичного растворения карбида титана в меди [6]. Поэтому для обеспечения хорошего смачивания и адгезии в системе TiC-Cu необходимы высокие температуры, которые исключают необходимость приложения высокого давления для получения качественных керметов системы TiC-Cu.

Недавно был предложен простой и энергоэффективный подход, в котором метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) использовался для получения пористого карбида титана (или его смеси с МАХ-фазой Ti₃SiC₂-TiC) при температуре до 2800 °C. Такая температура позволила провести немедленную самопроизвольную инфильтрацию расплавов различных металлов (Al, Sn, Cu) без применения внешнего давления [7–9]. Однако в случае использования расплава меди, полученного плавлением исходного порошка меди за счет теплоты СВС-реакции TiC, было обнаружено, что объема полученного расплава недостаточно для заполнения всего объема пор каркаса TiC. В то же время приготовление расплава меди в печи ($T = 1100$ °C), то есть за счет внешнего источника тепла, не позволяет добиться хорошего смачивания TiC при 1100 °C и, соответственно, полной пропитки расплава меди в каркас TiC. Настоящая работа направлена на решение данной проблемы путем использования более высокотемпературного расплава меди, полученного благодаря металлотермической реакции, в результате которой медный расплав может разогреваться до температуры, превышающей температуру кипения меди [10].

Методика проведения эксперимента

В данной работе для синтеза керамических каркасов TiC применялись порошки металлов следующих марок: титан марки ТПП-7 (≤ 300 мкм, чистота 99 %), углерод в форме сажи марки П701 (13–70 нм, чистота 99 %), данные порошки представляли собой СВС-шихту Ti+C массой 15 г; а также добавлялся порошок меди марки ПМС-А (99,5 %; 100 мкм) массой 0; 0,75; 1,5 и 2,25 г. для снижения скорости горения и получения более однородного каркаса TiC. В качестве средства зажигания СВС-шихты и основного источника расплава меди использовался порошок медной термитной смеси по ТУ 1793-002-12719185-2009 массой 40 г. Из приготовленной СВС-шихты с добавкой меди односторонним прессованием при помощи ручного пресса в стальной матрице диаметром 23 мм получали цилиндрические шихтовые брикеты. Полученный шихтовый брикет помещался в углубление в песке и обсыпался со всех сторон медной термитной смесью. Поджог термитной смеси производился с помощью нихромовой электрической спирали. Основным продуктом термитной реакции являлся расплав меди, от контакта с которым запускалась реакция СВС в шихтовом брикете. Быстрый саморазогрев шихтового брикета при протекающей реакции СВС приводил к самопроизвольной пропитке медного расплава в синтезируемый пористый TiC открытым сжиганием на воздухе без применения тиглей для металлотермической реакции и последующего процесса СВС каркаса TiC.

Результаты и их обсуждение

В результате были получены твердые цилиндрические образцы композитов TiC-Cu диаметром $20,1 \pm 0,1$ мм, высотой $19,4 \pm 0,8$ мм. Для оценки полноты пропитки в табл. 1 представлены массы полученных образцов керметов TiC-Cu с различной добавкой меди для давлений прессования СВС-шихт в 22; 34; 45; 56; 69 МПа.

Таблица 1

Зависимость массы образца кермета TiC-Cu от условий синтеза (добавки меди и давления прессования)

| Добавка меди | 22 МПа | 34 МПа | 45 МПа | 56 МПа | 69 МПа |
|--------------|--------|---------|---------------|--------|--------|
| 0 % | 15,6 г | 18,2 г | 26,4 г | 21,6 г | 22,7 г |
| 5 % | 27,4 г | 30,65 г | 31,7 г | 30,9 г | 27,4 г |
| 10 % | 22,0 г | 29,2 г | 31,6 г | 27,6 г | 27,9 г |
| 15 % | 26,8 г | 31,0 г | 28,5 г | 31,3 г | 28,4 г |

Из данных табл. 1 видно, что все образцы кермета имеют явный пик массы при давлении прессования СВС-шихты **45 МПа**, что указывает на наиболее полную пропитку при этом давлении прессования. Кроме того, видно, что при этом давлении прессования наибольшая масса кермета и, соответственно, более полная пропитка, наблюдается при добавлении 5 и 10 % масс. меди в СВС-шихту.

Для оценки полноты пропитки целесообразно произвести расчет плотности по имеющимся данным масс полученных керметов и их объемов. Расчет производился по формуле плотности твердого тела $\rho = m/V$. Результаты расчета плотности представлены в табл. 2.

Таблица 2

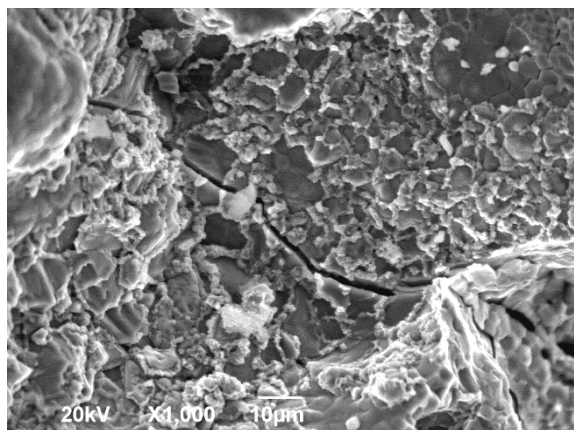
Плотность полученных образцов керметов TiC-Cu, г/см³, при различных значениях добавки меди и давлений прессования СВС-шихты

| Добавка меди | 22 МПа | 34 МПа | 45 МПа | 56 МПа | 69 МПа |
|--------------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| 0 % | 3,13 | 2,51 | 3,24 | 2,65 | 0 |
| 5 % | 3,78 | 3,38 | 3,89 | 3,79 | 3,78 |
| 10 % | 3,47 | 3,90 | 5,07 | 3,59 | 3,62 |
| 15 % | 3,48 | 3,61 | 3,70 | 4,61 | 5,01 |

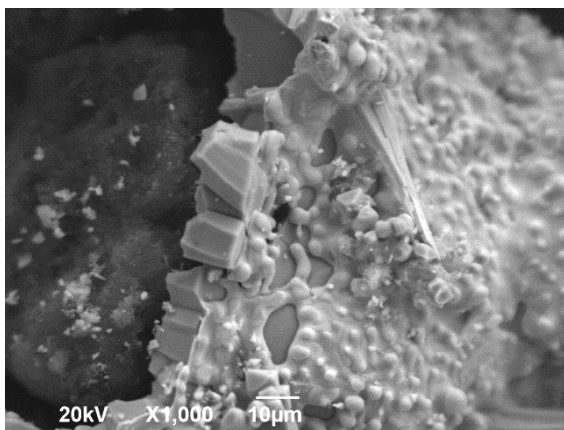
Из данных табл. 2 видно, что плотность образцов возрастает при увеличении добавки чистой меди в СВС-шихту. Кроме того, сохраняется пик максимальной плотности при давлении прессования 45 МПа и 10 мас. % добавке меди, что указывает на оптимальные условия для синтеза композитов с достижением наиболее полного уровня инфильтрации.

Изображения микроструктур образцов были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-7001F (Jeol, Japan) и представлены на рисунке.

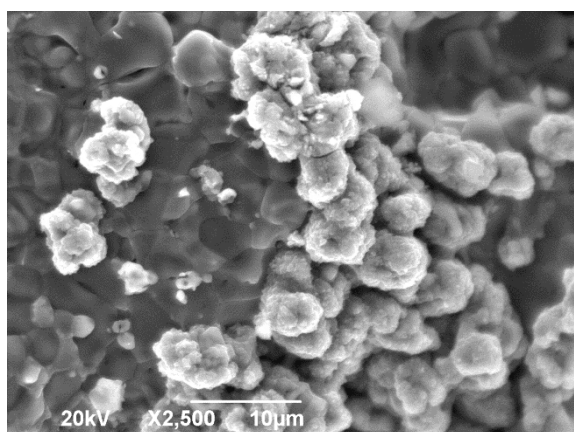
Из рисунка видно, что структура композитов представляет собой смесь округлых частиц карбида титана равноосной формы с размерами 5–15 мкм, включенных в медную матрицу. Стоит отметить, что наблюдается плотный контакт между керамическими частицами и медной матрицей без отслаиваний и систематических пор на межфазной границе.



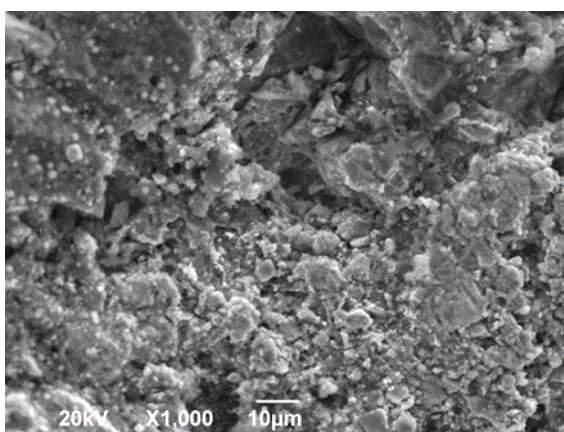
a



б



в



г

Фотографии микроструктуры образцов TiC-Cu с давлением прессования шихты 45 МПа, полученных:

a – без добавки меди; *б* – с 5 % добавкой меди;
в – с 10 % добавкой меди; *г* – с 15 % добавкой меди

Для исследования твердости полученных образцов керметов использовался твердомер ТН600. Полученные данные твердостей по результатам четырех измерений для каждого образца представлены в табл. 3.

Таблица 3

Твердость по Бринеллю полученных образцов керметов, $\text{HV} \cdot 10^{-1}$ МПа

| Добавка меди | 22 МПа | 34 МПа | 45 МПа | 56 МПа | 69 МПа |
|--------------|------------------|------------------------------------|------------------|-----------------|------------------|
| 0 % | $90 \pm 12,5$ | $78,75 \pm 4,3$ | $22 \pm 8,6$ | $53 \pm 9,0$ | 0 |
| 5 % | $68,5 \pm 16,4$ | $95,75 \pm 13,9$ | $75,25 \pm 20,9$ | $81,5 \pm 15,4$ | $45,25 \pm 22,5$ |
| 10 % | $81,25 \pm 12,1$ | $95 \pm 7,4$ | $31,75 \pm 11,0$ | $50 \pm 19,0$ | $33 \pm 7,2$ |
| 15 % | $71,75 \pm 6,5$ | $52 \pm 4,3$ | $88,5 \pm 5,1$ | $65 \pm 25,5$ | $56,25 \pm 25,2$ |

Как видно из данных испытаний, наибольшие показатели твердости **$95,75 \pm 13,9$** и **$95 \pm 7,4$** достигаются при давлениях прессования **34 МПа** и **добавках меди 5 и 10 %**, то есть в условиях, близких к оптимальным по плотности при давлении прессования **45 МПа** в табл. 1 и 2, однако не совпадающих с ними. Более высокая твердость образцов керметов TiC-Cu с меньшей плотностью (меньшей полнотой пропитки) может быть связана с повышенной долей твердой фазы TiC на фоне недостатка мягкой медной матрицы.

Заклучение

Таким образом, были получены керметы TiC-Cu путем сочетания методов СВС и металлотермии открытым способом на воздухе без тиглей для металлотермической реакции и процесса СВС. Оценено влияние давления прессования СВС-шихты (22, 34, 45, 56, 69 МПа) и добавления меди к ней (0, 5, 10, 15 мас.%) на плотность и твердость керметов TiC-Cu. Установлено, что наибольшая полнота пропитки наблюдается при давлении прессования шихты 45 МПа и добавке меди 5–10 %, а наибольшая твердость – при несколько меньшем давлении прессования – 34 МПа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10187, <https://rscf.ru/project/24-79-10187/>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Eremenko, V.N. / V.N. Eremenko, V.V. Fisenko // *The Role of Surface Phenomena in Metallurgy*; ed. V.N. Eremenko. – NY, 1963. – Pp. 117–119.
2. Xiao, P. / P. Xiao, B. Derby // *Acta Mater.* – 1996. – No. 44. – Pp. 307–314.
3. Ramqvist, L. / L. Ramqvist // *Int. Journal of Powder Metallurgy.* – 1965. – No. 1. – Pp. 2–8.
4. Nicholas, M.G. / M.G. Nicholas // *Surface and Interface of Ceramic Materials*; ed. L.C. Dufour et al. – Notwet Kluwer Academic, 1989. – Pp. 375–378.
5. Frage, N. Wetting of TiC by non-reactive liquid metals / N. Frage, N. Froumin, M.P. Dariel // *Acta materialia.* – 2002. – Vol. 50, No. 2. – Pp. 237–245.
6. Wetting phenomena in the TiC/(Cu–Al) system / N. Froumin, N. Frage, M. Polak, M.P. Dariel // *Acta materialia.* – 2000. – Vol. 48, No. 7. – Pp. 1435–1441.
7. Producing TiC-Al Cermet by Combustion Synthesis of TiC Porous Skeleton with Spontaneous Infiltration by Aluminum Melt / A. Amosov, E. Amosov, E. Latukhin, P. Kichaev, E. Umerov // *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). IEEE*; 2020. – Pp. 1057–62. – DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241903.
8. Amosov, A.P. Applying Infiltration Processes and Self Propagating High-Temperature Synthesis for Manufacturing Cermets / A.P. Amosov, E.I. Latukhin, E.R. Umerov // *A Review. Russian Journal of Non-Ferrous Metals.* – 2022. – Vol. 63, No. 1. – DOI: 10.3103/S1067821222010047.
9. Fabrication of MAX-Phase Composites by Novel Combustion Synthesis and Spontaneous Metal Melt Infiltration: Structure and Tribological Behaviors / E. Umerov, A. Amosov, E. Latukhin, K.U. Kiran, H. Choi, S. Saha, S. Roy // *Advanced Engineering Materials.* – 2024. – Vol. 26, No. 8. – P. 2301792. – DOI: 10.1002/adem.202301792.
10. Каракич, Е.А. Термитная сварка / Е.А. Каракич, А.Р. Самборук, Д.А. Майдан // *Современные материалы, техника технологии.* – 2021. – № 1 (34). – С. 63–67.

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С СОДЕРЖАНИЕМ МАХ-ФАЗ Ti_3AlC_2 И Ti_3SiC_2 МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИОННОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Креницын М.Г.^{1,2}, к.т.н., Новицкая О.С.¹, к.т.н., Рюмин Е.Е.¹, аспирант

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

г. Томск, Российская Федерация

E-mail: krinmax@gmail.com

Исследуется формирование композиционных материалов с содержанием МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 методом экструзионной аддитивной технологии. Авторы предлагают использовать модернизированную технологию FDM для 3D-печати композитов, что позволяет сохранить структуру МАХ-фаз благодаря низким температурам печати. Определены оптимальные параметры печати и исследованы трибологические свойства полученных материалов. Установлено, что содержание МАХ-фаз и температура спекания существенно влияют на коэффициент трения и износостойкость композитов.

Ключевые слова: МАХ-фазы, аддитивные технологии, трибология

FORMATION OF COMPOSITE MATERIALS CONTAINING MAX-PHASES Ti_3AlC_2 AND Ti_3SiC_2 BY EXTRUSION-BASED ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY

Krinityn M.G.^{1,2}, PhD in Engineering Sciences,

Novitskaya O.S.¹, PhD in Engineering Sciences, Ryumin E.E.¹, PhD student

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

E-mail: krinmax@gmail.com

The article investigates the formation of composite materials containing MAX phases Ti_3AlC_2 and Ti_3SiC_2 using extrusion-based additive manufacturing technology. The authors propose using a modified FDM technology for 3D printing composites, which allows preserving the structure of MAX phases due to low printing temperatures. The study determines the optimal printing parameters and examines the tribological properties of the obtained materials. It is established that the content of MAX phases and sintering temperature significantly influence the friction coefficient and wear resistance of the composites.

Keywords: MAX-phases, additive manufacturing, tribology

Слоистые материалы МАХ-фазы – тройные соединения, где М – переходный металл, А – элемент группы А, а Х – углерод или азот [1, 2]. Главной особенностью МАХ-фаз является уникальное сочетание свойств металлов (пластичность, обрабатываемость, достаточная электро- и теплопроводность) и керамики (высокая прочность, износостойкость, хрупкий характер разрушения) в едином материале. Проблема заключается в том, что несмотря на привлекательность свойств материалов на основе МАХ-фаз, процесс получения объектов сложной формы из порошков этих материалов до сих пор остается неизученным. В частности, особенностью МАХ-фаз является их разложение на более простые компоненты при температурах ниже температуры спекания. Так, у МАХ-фазы Ti_3SiC_2 наблюдается разложение на соединения Ti-C, Si-C и Ti-Si уже при 800–1000 °С, тогда как температура спекания

находится в диапазоне 1300–1500 °С. Наибольшего успеха при производстве трехмерных объектов из МАХ-фаз добились группы исследователей, сфокусированных на низкоэнергетических аддитивных технологиях (например, Laminated Object Manufacturing или Inkjet 3D printing). Одной из активно развивающихся низкоэнергетических аддитивных технологий для получения объектов из МАХ-фаз является экструзионная 3D-печать наполненными полимерами.

Технология экструзионной печати чистыми полимерами, известная как FDM, на сегодняшний день является одной из наиболее развитых и распространенных в мире технологий 3D-печати. Модернизированная технология FDM, использующая наполненный полимер для 3D-печати, наследует все особенности технологии FDM, при этом в конечном итоге позволяет формировать изделия из металлов, керамики и прочих материалов, изначально введенных в полимер. Такая технология обеспечивает сохранение МАХ-фазы в процессе печати за счет низких рабочих температур (не более 300 °С). Необходимо определить оптимальные экспериментальные условия процессов экструзионной печати полимеров, наполненных МАХ-фазой.

Одна из наиболее известных МАХ-фаз является фаза Ti_3SiC_2 , имеющая слоистую структуру и способная выступать в качестве твердого самосмазывающегося материала с низким коэффициентом трения [3, 4]. При этом Ti_3SiC_2 обладает хорошей электропроводностью и низким удельным весом, что делает указанную МАХ-фазу идеальной для применения в электротехнике, в частности в контактах скольжения. Так, в литературе описываются случаи использования композитов $Cu-Ti_3SiC_2$ в качестве материалов пантографов для высокоскоростных поездов. Однако указанные изделия получены методом искрового плазменного спекания либо горячего прессования, что вносит ограничения в форму изделий. В связи с этим целью настоящей работы является получение композитов $Cu-Ti_3SiC_2$ методом экструзионной аддитивной технологии и исследование трибологических свойств полученных материалов.

Установлено, что для достижения наибольшей плотности образцов композитов $Cu-Ti_3AlC_2$ необходимо использовать следующие параметры работы принтера: диаметр сопла 0,8 мм, температура сопла 140 °С, толщина слоя 200 мкм, скорость печати 60 мм/с, коэффициент экструзии 1,4, обязательно наличие обдува области печати. В образцах, спеченных при 1000 °С, присутствуют микронные поры размером не более 5 мкм. В образцах, спеченных при 1050 °С, также присутствуют поры, но их средний размер $1,4 \pm 0,7$ мкм (рис. 1). Плотность, определенная по отношению к плотностям напечатанных и спрессованных образцов, составляет $5,2 \pm 0,4$ % и $3,7 \pm 0,6$ % для напечатанных образцов, спеченных при 1000 и 1050 °С соответственно.

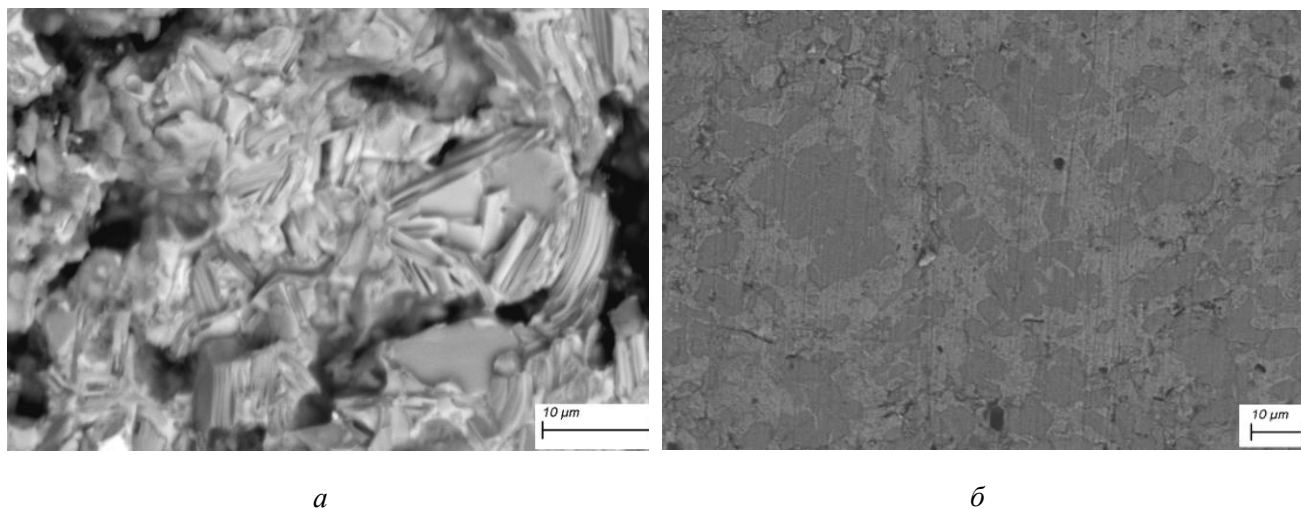


Рис. 1. Поверхность разрушения (а) и шлиф (б) образцов $Cu-Ti_3AlC_2$ после спекания при 1050 °С

С целью сравнения трибологического поведения образцов композиционных материалов, содержащих МАХ-фазу Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 были изучены поверхности трения (рис. 2) после испытаний при идентичных условиях трения ($V = 0,05$ m/s, $T = 25$ °C, $F_n = 2$ N). Полученные изображения SEM BSE и соответствующие карты EDS позволяют наблюдать, что поверхности износа образцов представлены в основном оксидами. Плотное распределение по поверхности износа кислород подтверждает, что механизм износа окислительный. Наличие элементов С и Ti, которые входят в состав Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 , говорит о том, что образующийся смешанный оксидный слой может выступать в роли своего рода смазочного слоя.

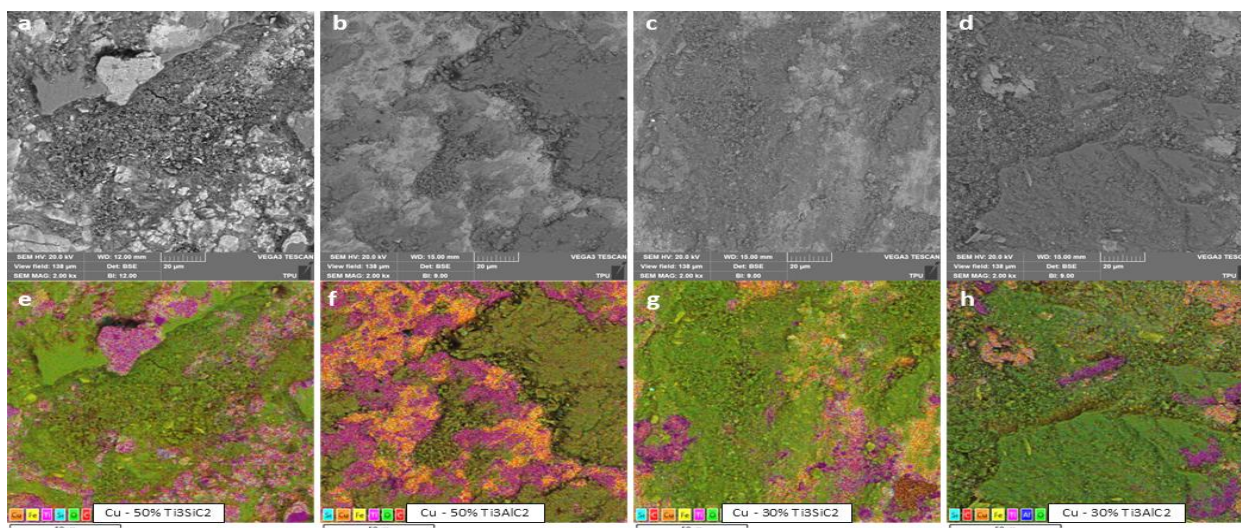


Рис. 2. SEM изображения и карты EDS поверхности износа после трибологических испытаний образцов № 2 (a-e), № 4 (b-f), № 5 (c-g) и № 6 (d-h) при $V = 0.05$ m/s, $T = 25$ °C, $F_n = 2$ N

Процентное содержание Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 в образцах оказывает существенное влияние на трибологические свойства исследуемых материалов. Увеличение содержания Ti_3SiC_2 с 30 до 50 % приводит к снижению коэффициента трения с 0,46 до 0,28 в образцах № 5 и № 2 соответственно. Аналогично, увеличение Ti_3AlC_2 с 30 до 50 % приводит к снижению CoF с 0,51 до 0,27 в образцах № 6 и № 4 соответственно.

Если сравнивать плотность оксидного слоя у образцов, содержащих разную МАХ-фазу, то можно отметить, что образцы, имеющие в составе Ti_3AlC_2 , более склонны к окислению. Это может быть связано с тем, что алюминий имеет более высокую реакционную способность и легче окисляется, чем кремний, входящий в состав МАХ-фазы Ti_3SiC_2 . За это ответственны его положение в периодической таблице элементов и электронная конфигурация.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10169, <https://rscf.ru/project/24-79-10169/>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Barsoum, M.W. The $MN^{+1}AX_n$ phases: A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates / M.W. Barsoum // Progress in solid state chemistry. – 2000. – Vol. 28, No. 1–4. – Pp. 201–281.
2. In-situ hot pressing/solid-liquid reaction synthesis of dense titanium silicon carbide bulk ceramics / Y. Zhou et al. // Material Research Innovations. – 1998. – Vol. 2. – Pp. 142–146.
3. Influence of Cu on the mechanical and tribological properties of Ti_3SiC_2 / W. Dang et al. // Ceramics International. – 2016. – Vol. 42, No. 8. – Pp. 9972–9980.
4. Tribological properties of Ti_3SiC_2 coupled with different counterfaces / Y. Zhu et al. // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41, No. 5. – Pp. 6950–6955.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ РЕЗЦОВ

Колибасов В.А., аспирант, **Ибатуллин И.Д.**, д.т.н., профессор, **Новиков В.А.**, к.т.н., доцент

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

Исследуется потенциал рентгенофазового анализа (РФА) как экспресс-метода для оценки износостойкости PDC-резцов, также рассматривается инновационный триботехнический стенд, в котором используется алмазный отрезной диск в качестве имитации забоя для тестирования различных типов PDC-резцов на износ при фрикционном контакте с металло-алмазной поверхностью. Цель настоящей работы: исследование целесообразности использования различных методик при анализе стойкости к изнашиванию поликристаллических алмазных резцов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью быстрой и экономически эффективной оценки качества резцов, поступающих на производство буровых долот. Традиционные методы оценки износостойкости, основанные на длительных испытаниях на трение, затратны и не всегда позволяют выявить корреляцию между микроструктурой резца и его эксплуатационными характеристиками. РФА, будучи неразрушающим и быстрым методом, предоставляет возможность детально изучить фазовый состав, размер зерен алмаза, наличие дефектов и остаточные напряжения, которые непосредственно влияют на износостойкость.

Ключевые слова: PDC-резцы, абразивное изнашивание, алмазный отрезной диск, трение, рентгенофазовый анализ

METHODS FOR ASSESSING THE WEAR RESISTANCE OF POLYCRYSTALLINE DIAMOND CUTS

Kolibasov V.A., PhD student, **Ibatullin I.D.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Novikov V.A.**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

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

This article explores the potential of X-ray phase analysis (XFA) as an express method for assessing the wear resistance of PDC cutters and also examines an innovative tribotechnical stand that uses a diamond cutting disc as a face simulation to test various types of PDC cutters for wear during frictional contact with a metal-diamond surface. The purpose of this work is to study the feasibility of using various techniques in analyzing the wear resistance of polycrystalline diamond cutters. The relevance of the study is due to the need for a quick and cost-effective assessment of the quality of the cutters supplied to the production of drill bits. Traditional methods for assessing wear resistance based on long-term friction tests are expensive and do not always allow us to identify a correlation between the microstructure of the cutter and its performance characteristics. XRD, being a non-destructive and fast method, provides an opportunity to study in detail the phase composition, the size of diamond grains, the presence of defects and residual stresses that directly affect wear resistance.

Keywords: PDC cutters, abrasive wear, diamond cutting disc, friction, X-ray phase analysis

Поликристаллические алмазные резцы (PDC) широко используются в буровых долотах благодаря своей исключительной твердости и износостойкости. Однако эксплуатационные характеристики PDC-резцов могут варьироваться от партии к партии, а существующие методы полевых испытаний длительны и дорогостоящи. Это обуславливает необходимость разработки экспресс-методов оценки износостойкости PDC-резцов, позволяющих проводить

оперативный входной контроль качества. Одним из перспективных направлений является применение рентгенофазового анализа (РФА) для изучения микроструктуры PDC-резцов и ее корреляции с износостойкостью.

В литературе описаны различные методы исследования характеристик PDC-резцов, включая рентгенофазовый анализ, сканирующую электронную микроскопию (SEM), просвечивающую электронную микроскопию и рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию [1, 3]. РФА позволяет определить фазовый состав и структуру материалов, что важно для понимания их поведения при износе. В частности, размер зерна алмаза, распределение кобальтовой связки и наличие примесных фаз могут существенно влиять на износостойкость PDC-резцов [1, 2]. Изменение микроструктуры в результате термических воздействий, таких как графитизация алмазного слоя, также может быть проанализировано с помощью РФА [3]. Более того, использование РФА в сочетании с микрорентгеновской дифракцией позволяет изучать изменения в фазовом составе и структуре как до, так и после испытаний на износ [1], обеспечивая понимание механизмов разрушения.

Хотя полевые испытания, имитирующие реальные условия работы резца, остаются важным инструментом, РФА предоставляет быстрый и экономичный способ предварительной оценки качества PDC-резцов, связывая микроструктурные особенности с износостойкостью. Этот экспресс-метод может быть интегрирован в систему входного контроля, позволяя быстро и эффективно выявлять резцы, не соответствующие заявленным характеристикам, что способствует снижению затрат и повышению эффективности бурения.

В то время как традиционные методы оценки износостойкости PDC-резцов, такие как испытания на трение о горные породы или абразивные материалы, предоставляют информацию об общей износостойкости, они зачастую не позволяют выявить конкретные микроструктурные факторы, влияющие на процесс износа. РФА, в отличие от этих методов, способен идентифицировать и количественно оценить фазовый состав, размер зерна, наличие дефектов и остаточных напряжений в PDC-резцах. Эти данные могут быть использованы для более глубокого понимания механизмов износа и прогнозирования поведения резцов в реальных условиях бурения. Например, РФА может выявить наличие графита, образовавшегося в результате термической деградации алмаза, или определить изменения в кристаллической структуре карбида вольфрама, что напрямую связано с износостойкостью резца.

Преимущества РФА как экспресс-метода оценки износостойкости PDC-резцов включают в себя:

- быстрота: РФА анализ занимает значительно меньше времени по сравнению с полевыми испытаниями на износ, позволяя быстро оценить большое количество образцов;
- низкая стоимость: РФА требует меньше ресурсов и расходных материалов, чем натурные испытания, что снижает затраты на контроль качества;
- неразрушающий контроль: РФА не разрушает исследуемый образец, позволяя проводить дальнейшие исследования или использовать его по назначению;
- высокая точность: современные РФА-методы обеспечивают высокую точность в определении фазового состава и структурных характеристик материалов.

Метод изнашивания PDC-резцов основан на схеме трения «кромка резца – алмазный отрезной диск». Так, на кафедре «Машины и оборудования нефтегазовых и химических производств» Самарского государственного технического университета был разработан лабораторный программно-аппаратный комплекс [4]. Схема узла трения (рис. 1) данного комплекса в целом схожа со схемой натуральных испытаний. В отличие от реальных условий, здесь резец остается неподвижным, а устройство, имитирующее забой, вращается. При этом поликристаллическая алмазная пластина врезается своим краем в перевернутый «забой» под определенным эксплуатационным углом наклона. Такая конфигурация способствует естественному удалению продуктов износа – частицы самостоятельно осыпаются из области трения благодаря перевернутому положению забоя относительно режущего инструмента.

Методика испытаний резцов PDC на износостойкость включает в себя следующие этапы:

1. Нагрев резца PDC до температуры от 600 до 800 °С перед началом испытаний.
2. Создание отверстия для фиксации в алмазном отрезном диске.

3. Взвешивание резца PDC и алмазного отрезного диска с точностью до 0,0001 г.
4. Фиксация резца PDC в гнезде оправки и предотвращение его проворота во время испытаний.
5. Закрепление алмазного отрезного диска на оправке для последующего крепления в патроне привода вращения.
6. Включают в систему охлаждения для измерительного блока.
7. Запускают привод вращения и устройство для сбора, обработки, мониторинга и сохранения данных, опускают алмазный диск на алмазную поликристаллическую пластину. Прикладывают нагрузку на контакт. Рекомендуемая нормальная нагрузка на контакт составляет 100–300 Н. Повышенная нагрузка приводит к значительному нагреву резца PDC во время испытаний.
8. Проводят испытание на износостойкость резца PDC в течение определенного времени, контролируя нагрузку, силу трения и температуру резца PDC в процессе испытаний. Рекомендуемая продолжительность проведения тестов составляет от 15 до 60 минут.
9. После завершения испытаний резец PDC с оправкой охлаждают до комнатной температуры и затем снова взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0001 г как режущий элемент PDC, так и алмазный отрезной диск.
10. Вычисляют величину весового износа режущего элемента PDC и алмазного отрезного диска (как разницу между начальной и конечной массой).

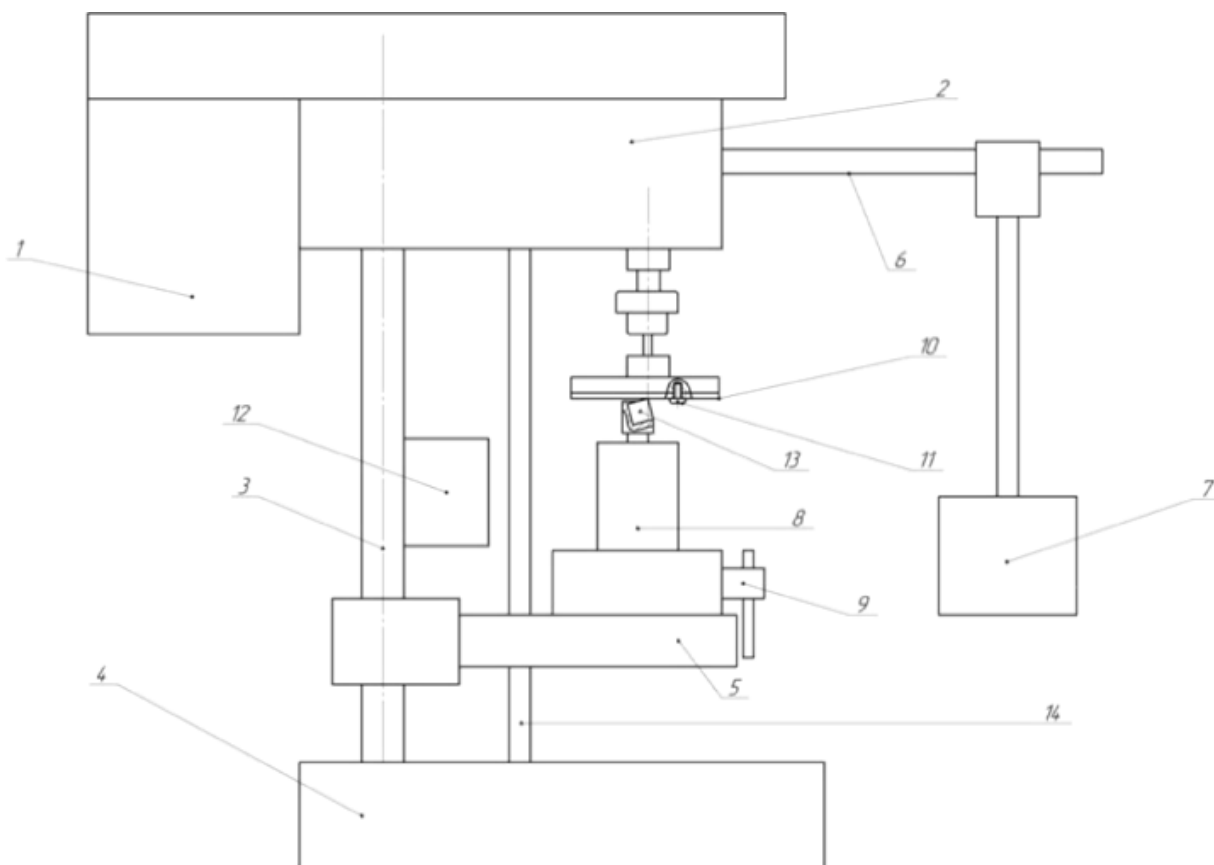


Рис. 1. Устройство для испытания резцов PDC на абразивное изнашивание:

- 1 – электродвигатель; 2 – шпиндельный узел; 3 – стойка; 4 – основание; 5 – консольный стол;
 6 – рычаг; 7 – груз; 8 – система сбора данных; 9 – тиски; 10 – алмазный отрезной диск;
 11 – фиксатор; 12 – охладитель; 13 – резец PDC; 14 – стяжка

Это гарантирует увеличение достоверности данных испытаний на износостойкость и дает возможность классифицировать разные группы резцов PDC по степени износа.

Результаты испытаний PDC-резцов на абразивное изнашивание на предложенном устройстве приведены на рис. 2.



Рис. 2. Вид изношенного участка PDC-резцов класса 20ДТВ при триботехнических испытаниях по схеме «кромка зубка – алмазный диск»

В результате испытаний формируется отчетливое пятно износа, позволяющее легко ранжировать зубки по износостойкости. Низкая частота вращения диска обеспечивает отсутствие сильного нагрева пары трения, что позволяет исключить необходимость водяного охлаждения диска.

Выводы

Разработанное устройство для испытания резцов PDC на изнашивание показало высокую эффективность. Однако необходимо проводить дополнительные исследования для определения их эффективности в конкретных условиях эксплуатации. Также следует учитывать особенности породы и окружающей среды, чтобы максимально использовать преимущества таких резцов.

Перспективным направлением для неразрушающего контроля PDC-резцов является также применение методов, чувствительных к микроструктурным изменениям и ранним стадиям повреждения. Комбинирование нескольких методов неразрушающего контроля позволит получить наиболее полную информацию о состоянии PDC-резца и прогнозировать его остаточный ресурс. Также важно исследовать корреляцию результатов неразрушающего контроля с данными фрактографического анализа для более точной интерпретации полученных результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Impact fatigue fracture of polycrystalline diamond compact (PDC) cutters and the effect of microstructure / V. Kanyanta, A. Dormer, N. Murphy, A. Invankovic // *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2014. – Vol. 46. – Pp. 145–151. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2014.06.003.
2. Abdul-Rani, A.M. Study on the Effect of Diamond Grain Size on Wear of Polycrystalline Diamond Compact Cutter / A.M. Abdul-Rani, A.A. Bin Che Sidid, A.H. Ab Adzis // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 328. – P. 012004. – DOI: 10.1088/1757-899X/328/1/012004.
3. Quality and wear behavior of graded polycrystalline diamond compact cutters / M. Yahiaoui, J.-Y. Paris, K. Delbé, J. Denape, L. Gerbaud, C. Colin, O. Ther, A. Dourfaye // *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2016. – Vol. 56. – Pp. 87–95. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.12.009.
4. Разработка методики и устройства для испытания PDC-резцов на абразивное изнашивание / В.А. Колибасов, И.Д. Ибатуллин, К.В. Парфенов, Е.С. Гордеева // *Нефтегазовое дело*. – 2024. – Т. 22, № 6. – С. 53–62. – DOI: 10.17122/ngdelo-2024-6-53-62.

ЖИДКОФАЗНЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННЫХ КАРБИДНЫМИ ФАЗАМИ

Луц А.Р., к.т.н., доцент

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

Рассмотрено современное состояние вопроса по получению алюмоматричных композиционных материалов, армированных дисперсными фазами карбида кремния и титана, жидкофазными методами. Приведен анализ применяемых технологий, примеры их реализации, а также преимущества и трудности их исполнения. По результатам обзора выбраны и рекомендованы к применению наиболее подходящие технологии.

Ключевые слова: композиционный материал, карбид титана, карбид кремния, самораспространяющийся высокотемпературный синтез

LIQUID-PHASE METHODS FOR PRODUCING ALUMINUM-MATRIX COMPOSITE MATERIALS DISPERSED REINFORCED WITH CARBIDE PHASES

Luts A.R., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

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

The paper considers the current state of the issue of obtaining aluminum-matrix composite materials reinforced with dispersed phases of silicon carbide and titanium by liquid-phase methods. The analysis of applied technologies, examples of their implementation, as well as advantages and difficulties of their execution are given. Based on the results of the review, the most suitable technologies were selected and recommended for use.

Keywords: composite material, titanium carbide, silicon carbide, self-propagating high-temperature synthesis

Композиционные материалы представляют собой гетерогенные системы на основе металлов или сплавов, содержащие как минимум одну армирующую фазу, не вступающую в химическое взаимодействие с матричной основой. Перспективность таких конструкционных материалов для мировой промышленности подтверждается тем, что Всемирная литейная организация выделила направление по металломатричным композитам в одно из восьми наиболее важных направлений развития. Более 50 % современных исследований посвящены разработке алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ), которые при относительно небольшой стоимости сохраняют малый удельный вес, достаточную деформируемость и коррозионную стойкость, но одновременно с этим характеризуются повышенными значениями твердости и износостойкости. В качестве второй фазы для армирования АМКМ наиболее часто находят применение керамические соединения, из многочисленного ряда которых наиболее высокими показателями физико-механических характеристик обладают карбиды титана и кремния. В частности, можно выделить их высокую температуру плавления – 3433 и 2900 К (для TiC и SiC соответственно), модуль упругости – $440 \cdot 10^9$ и $350 \cdot 10^9$ Н/м², микротвердость (HV) – $32 \cdot 10^9$ и $24\text{--}28 \cdot 10^9$ Н/м², удельную прочность $1,2\text{--}1,54 \cdot 10^9$ и $0,4\text{--}1,7 \cdot 10^9$ Н/м², что обеспечивает, соответственно, улучшенные свойства получаемых с их применением композитов.

К настоящему времени разработано и внедрено в производство множество технологий получения АМКМ, но наиболее доступной по исполнению и экономически выгодной является объединенная группа жидкофазных методов, общим классификационным признаком которой является армирование расплава матрицы, нагретого до необходимого уровня температур (как правило, 700–1000°). Для организации подобного производства необходимы лишь традиционные плавильные печи, а последующая заливка расплавов после проведенного армирования может осуществляться в литейные формы любых размеров и конфигурации.

По технологическому исполнению в процессе армирования жидкофазные способы подразделяют на две большие подгруппы: 1) в случае, когда частицы керамической фазы изготавливаются отдельно любым самостоятельным способом производства (печной синтез, СВС, плазмохимический и др.), а уже потом вводятся в расплав, процесс называется *ex situ*; 2) если керамические частицы образуются из исходных компонентов, называемых прекурсорами, именно в разогретом матричном расплаве, то процесс относится к методам *in situ*. Обе группы методов имеют свои преимущества и находят применение в промышленности, поэтому целесообразно рассмотреть некоторые примеры их использования.

Из группы *ex situ* наиболее активно развивающимся способом можно назвать метод жидкой пропитки, суть которого состоит в том, что предварительно прессованную заготовку из армирующего наполнителя нужной конфигурации заливают и пропитывают алюминиевым расплавом; во избежание протекания посторонних химических реакций процесс, как правило, проводят в печи с инертной атмосферой или под вакуумом. Например, сообщается о возможности вакуумно-компрессионной пропитки преформы (заготовки) из частиц SiC (68–70 об. %) алюминиевым сплавом АК7 с получением беспористого композита, прочность которого при изгибе составляет 400 МПа, теплопроводность 165 Вт/м·К и ТКЛР равен $6,90 \text{ 1/К} \cdot 10^{-6}$ в интервале температур 25–150 °С [1]. Также делаются первые попытки осуществления пропитки каркаса из карбида титана расплавом алюминия за счет действия капиллярных сил, что уже позволило получить материал TiC-Al с прочностью 330–390 МПа при остаточной пористости до 11 % [2].

Наиболее широко известным и применяемым на практике из группы *ex situ* является метод механического замешивания – традиционный ввод армирующей фазы в нужной концентрации в расплав при параллельно оказываемом механическом или физическом воздействии для более равномерного распределения частиц по объему слитка. В некоторых случаях армирующая фаза вводится в составе лигатурного сплава, полученного предварительно, но гораздо чаще осуществляют ввод в жидкий или твердожидкий расплав самих дисперсных частиц сразу в требуемой концентрации. За рубежом АМКМ, изготовленные методом механического замешивания, уже активно внедряются в промышленное производство и, например, компания Duralcan выпускает широкий спектр композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов различных систем легирования, содержащих керамическую фазу карбида кремния, а фирмой Martin Marietta полученный композит с фазой карбида титана применяется для производства отливок антифрикционного назначения для применения в двигателях внутреннего сгорания легковых автомобилей. В нашей стране за последние годы также ведутся разработки в данном направлении: например, в работе [3] предлагаются дисперсно армированные АМКМ, полученные замешиванием карбидных фаз в матричную основу силумина: АК12М2МгН – (5,10) % SiC, АК12М2МгН – (5,10) % TiC. Помимо снижения стоимости с одновременным уменьшением массы (по сравнению с медными сплавами не менее чем в три раза) получаемые значения задиростойкости, коэффициента износа, максимально допустимой нагрузки и прочие трибологические свойства композитов существенно превосходят аналогичные, характерные для традиционных антифрикционных материалов типа АОМ20-1 и БрО5Ц5С5. Дополнительное тестирование композитов с 10 % TiC на испытательном стенде при удельном радиальном давлении 0,1 МПа и скорости скольжения 5 м/с в условиях, приближенных к реальным, также подтвердили преимущество АМКМ, что дало основание рекомендовать их для применения в качестве радиальных подшипников в электрических центробежных насосах для добычи нефти.

Отдельной группой представлены исследования, в которых полученные *ex situ* АМКМ наносятся на стальную основу в качестве рабочего антифрикционного слоя; подобные материалы получили название функционально-градиентных. Например, в работе [3] в расплавы различных систем легирования – Al, Al-Cu-Mg, Al-Si-Cu и др. – механически замешиваются керамические частицы Al_2O_3 , B_4C , SiC или TiC в количестве 5–10 масс. %, а затем полученные составы переносятся на стальную поверхность посредством электродуговой или плазменно-порошковой наплавки. Все получаемые АМКМ характеризуются повышением износостойкости, но максимальное увеличение обеспечивает добавка 10 % TiC, что гарантирует увеличение износостойкости до 10 раз и снижение коэффициента трения на 60 % в сравнении со сплавами АО20-1 и Б83.

Главным преимуществом АМКМ, полученных с применением метода механического замешивания, является простота исполнения и хорошая адгезионная связь, что обеспечивает достаточный уровень механических свойств, но вместе с тем введение значительного количества армирующей фазы может сопровождаться существенным повышением вязкости расплава и, соответственно, ухудшением литейных свойств, а кроме того, затруднено введение в расплав армирующих частиц высокой дисперсности. Поэтому зачастую при реализации механического замешивания используют разнообразные технологические приемы, к числу наиболее распространенных из которых можно отнести: введение армирующей фазы в твердо-жидкий расплав, разогретый до уровня температуры ликвидус, инжекция расплава алюминия в присутствии инертной атмосферы с параллельным внесением газовым потоком частиц армирующей фазы, спиннингование композита в виде тонкой ленты на вращающемся колесе и некоторые другие, и, кроме того, разнообразное физическое воздействие на расплав композита: плавка под давлением, дополнительное перемешивание расплава посредством приложенного ультразвукового, индукционного, магнитоимпульсного и других видов воздействия. Интересный подход, например, показан работе [3], где изучалась возможность механического замешивания в расплав алюминия керамической наноразмерной системы Si_3N_4 -SiC в составе прессованной заготовки вместе с металлическими порошками – Al, Cu, Ni. Но несмотря на множество использованных приемов, включая воздействие на расплав акустических полей, удалось получить АМКМ с содержанием менее 0,1 % армирующей фазы. Помимо проблем с усвоением и стабильностью в случае механического замешивания частиц в расплав зачастую наблюдается захват газа и, как следствие, возникает пористость отливок композита, а также возможно протекание нежелательных химических реакций между матрицей и второй фазой.

Исключить указанные трудности можно в случае применения второй группы жидкофазных методов, имеющих общее название *in situ*. Синтез, происходящий в расплаве, позволяет получать армирующие частицы высокой дисперсности (с размерами менее 1 мкм), которые в силу высоких температур, возникающих в зоне реакции, отлично смачиваются жидким алюминием, что, соответственно, способствует получению отливок с высокими механическими свойствами и минимальной пористостью. В настоящее время промышленностью востребованы такие *in situ*-методы, как горячее реакционное прессование, прямое окисление расплава посредством продувки кислородом, армирование с применением флюсов и др. Однако подобное армирование можно реализовать лишь при высокой экзотермичности химического взаимодействия исходных компонентов, которое, в свою очередь, обеспечивает высокие температуры в зоне реакции и хорошую смачиваемость расплавом образуемых частиц. Принимая во внимание, что тепловой эффект реакции по абсолютной величине из элементных порошков для соединения TiC составляет 184,9 кДж/моль, а для SiC – всего 69,14 кДж/моль, то очевидно, что синтез *in situ* АМКМ с фазой карбида кремния осуществить довольно сложно [4], поэтому способ применяется преимущественно для армирования фазой карбида титана. Сообщается о проведении синтеза фазы карбида титана в расплаве матричного металла с использованием газообразных реагентов, в частности, путем ввода в расплав Al-Ti смеси аргона и CH_4 [3] или совмещением при температуре 750 °С расплавов Al – 4,5 % Cu и лигатуры Al – 10 % Ti с последующей продувкой газом C_2Cl_6 , в результате

чего образуется карбидная фаза с размерами 0,1–0,8 мкм, способствующая повышению прочностных характеристик со 115 до 145 МПа, а также твердости с 60 до 90 НВ относительно исходного сплава. Но для практической реализации подобных вариантов необходимо дополнительное оборудование, а кроме того, достаточно сложно точно обеспечить необходимое количество частиц карбидной фазы. Для другого ряда работ характерно использование в качестве источника титана титаносодержащих солей: в работе [3] предлагаются АМКМ Al – (3–10) % TiC, получаемые в расплаве при температуре 1200 °С из введенной смеси соли K_2TiF_6 и углерода, но в этом случае существенно увеличивается количество шлака и снижается выход годного продукта. Поэтому чаще всего для синтеза карбидной фазы используются традиционные порошковые формы титана и углерода. С их применением была разработана и внедрена в промышленное производство самая перспективная *in situ*-технология, представляющая собой синтез армирующих фаз в расплаве алюминия при температурах 800–1000 °С, первоначально названная САМ-процесс – синтез армирующих материалов, однако в дальнейшем технология получила название самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) в расплаве. Исследования, проведенные в СамГТУ, показали, что данный метод не требует дополнительного оборудования, кроме плавильных печей, характеризуется высокой экономической эффективностью ввиду быстротечности синтеза, но при этом позволяет синтезировать наноразмерную фазу карбида титана из элементных порошков углерода и титана с размером частиц от 100 нм в количестве до 10 масс. %. Сравнение механических показателей позволило установить, что СВС армирование высокодисперсными частицами карбида титана обеспечивает трехкратное повышение характеристик прочности, твердости и ударной вязкости АМКМ состава Al – 10 % TiC по сравнению с матричным алюминием.

В целом проведенный обзор показал, что АМКМ, дисперсно армированные карбидными фазами, относятся к группе перспективных конструкционных материалов, а для их изготовления целесообразно применение жидкофазных способов, но для армирования фазой карбида кремния наиболее подходящим способом является механическое замешивание частиц в расплав, а для армирования фазой карбида титана – СВС в расплаве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Няфкин, А.Н. Теплоотводящие основания из металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава для силовой электроники и преобразовательной техники / А.Н. Няфкин, А.А. Шавнев // *Материалы Всерос. научно-техн. конференции.* – М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. – С. 141.
2. Разработка технологии получения металлокерамического композита TiC-Cu путем применения металлотермического процесса для инфильтрации расплавом металла керамического СВС-каркаса / Е.А. Каракич, А.П. Амосов, Е.И. Латухин, Э.Р. Умеров // *Высокие технологии в машиностроении: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием.* – Самара, 2024. – С. 242–246.
3. СВС алюмокерамических композитов / А.П. Амосов, А.Р. Луц, Е.И. Латухин, Ю.В. Титова, Д.А. Майдан // *Технологическое горение: сборник трудов под общей редакцией академика С.М. Алдошина и чл. корр. РАН М.И. Алымова.* – 2018. – С. 287–316.
4. Крутский, Ю.Л. Расчет основных технологических показателей процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза тугоплавких соединений: учеб. пособие / Ю.Л. Крутский. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 52 с.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ АВИАЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Муратов В.С.¹, д.т.н., профессор, **Морозова Е.А.**¹, к.т.н., доцент,
Якимов Н.С.², к.т.н., главный металлург

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² ОАО «ЕПК Самара», г. Самара, Российская Федерация

E-mail: andrej.bakin2013@yandex.ru

Разработаны варианты и режимы термической обработки авиационных изделий, которые изготавливаются из крупногабаритных штампованных заготовок и поковок сплавов на алюминиевой основе системы Al-Zn-Mg-Cu. Исследованы особенности формирования структуры, механических свойств и сопротивляемости коррозионному растрескиванию. Предложен дифференцированный подход к определению времени выдержки при ступенях старения в зависимости от состава сплава, формы и размеров изделия, требуемого уровня свойств.

Ключевые слова: авиационная техника, алюминиевые сплавы, термическая обработка, структура, механические свойства, коррозионная стойкость

HEAT TREATMENT OF LARGE-SIZED AVIATION PRODUCTS MADE OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOYS

Muratov V.S.¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Morozova E.A.**¹, PhD in Engineering Science, Associate Professor, **Yakimov N.S.**², PhD in Engineering Sciences, chief metallurgist

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

² JSC "EPK SAMARA", Samara, Russian Federation

E-mail: andrej.bakin2013@yandex.ru

Variants and modes of heat treatment of aviation products have been developed, which are made from large-sized stamped blanks and forgings of aluminum-based alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system. The features of the formation of the structure, mechanical properties and resistance to corrosion cracking are investigated. A differentiated approach to determining the holding time at aging stages is proposed, depending on the alloy composition, shape and size of the product, and the required level of properties.

Keywords: aviation technology, aluminum alloys, heat treatment, structure, mechanical properties, corrosion resistance

Введение

Алюминиевые высокопрочные сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu широко используются в производстве авиационной техники [1–3]. Сплавы 1933 и В93пч применяются для производства ряда силовых узлов самолета – шпангоутов, лонжеронов, траверс, рам, тяг, корпусов. Важной проблемой надежности эксплуатации изделий из данных сплавов является достижение их необходимой коррозионной стойкости. Основным методом обеспечения высокой стойкости к опасным коррозионным воздействиям является отработка и применение режимов ступенчатого смягчающего старения в вариантах Т2, Т3. Кроме того, выявлена проблема обеспечения требуемого уровня комплекса механических свойств деталей крупных размеров, используемых в самолетах Ту-214 и SSJ-NEW, после проведения окончательной термической обработки.

Цель работы – разработать варианты термической обработки для обеспечения заданного уровня механических свойств и сопротивляемости коррозионному воздействию

деталей авиационной техники, изготавливаемых из деформированных крупногабаритных заготовок Al-Zn-Mg-Cu сплавов.

Методика выполненных исследований

Исследованы детали авиационной техники, изготовленные из сплавов 1933 (поковки) и В93пч (штампованные заготовки). На рис. 1 показаны размеры исходных поковок; габариты исходных штампованных заготовок составляют 1790x980 мм. В табл. 1 приведен химический состав указанных сплавов.

Для проведения термической обработки деталей использованы печи электросопротивления ПА-56 и ПА-54, исследования микроструктуры проводились на световом микроскопе марки Olympus GX71, электропроводность измерялась на приборе «КОНСТАНТА К6». Определение механических свойств выполнялось по ГОСТ 1497-84 (испытания на растяжение на установке ГУРМ-20). Твердость определялась по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59 (ИСО 410-82)).

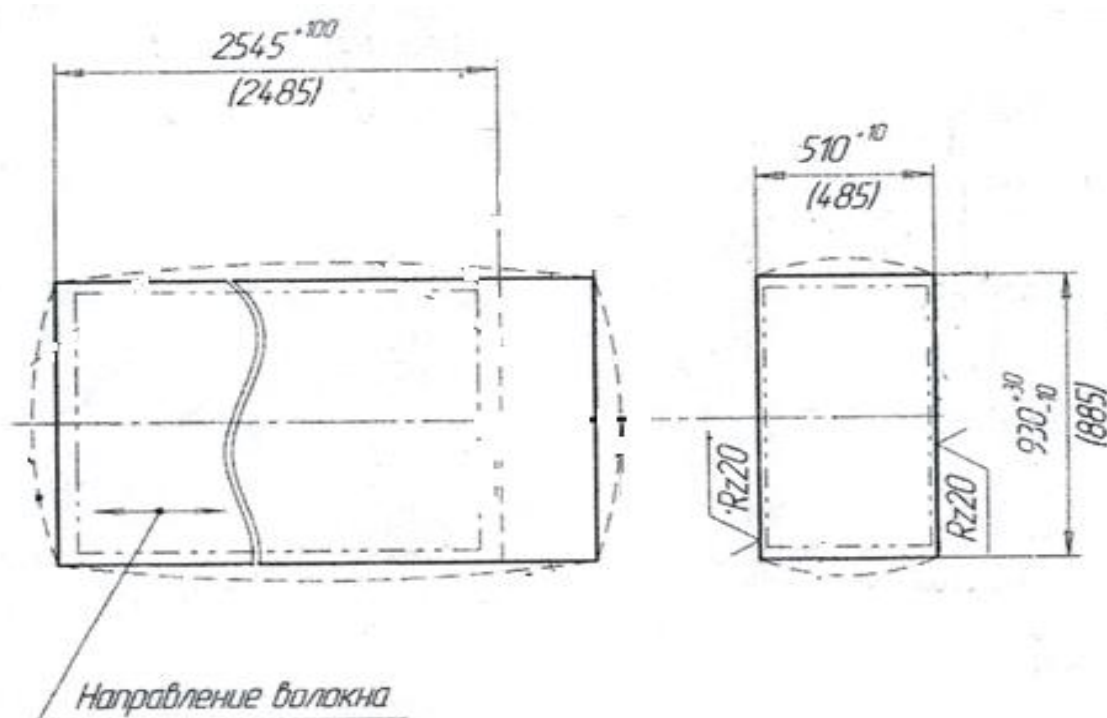


Рис. 1. Эскиз исходной поковки (сплава 1933)

Таблица 1

Химический состав сплавов (масс. %)

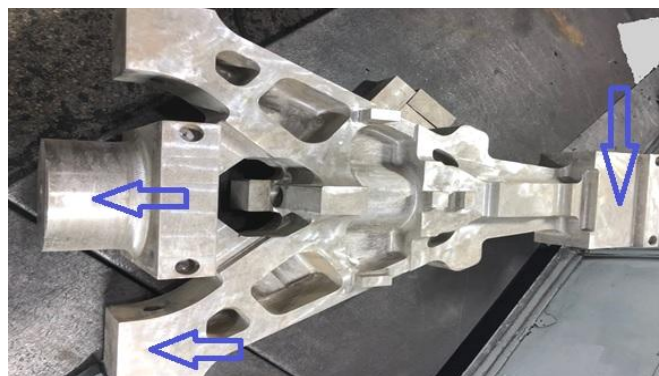
| Сплав | Zn | Mg | Cu | Mn | Fe | Cr | Si | Ti | Be | Zr | Al |
|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 1933 | 6,5 | 1,8 | 0,9 | 0,01 | 0,09 | 0,01 | 0,02 | 0,4 | 0,001 | 0,04 | Осн. |
| В93пч | 6,7 | 1,9 | 1,0 | – | 0,31 | – | – | 0,01 | – | – | Осн. |

Авиационные детали, которые подвергались термической обработке, приведены на рис. 2 (области измерения электропроводности сплава указаны стрелками).

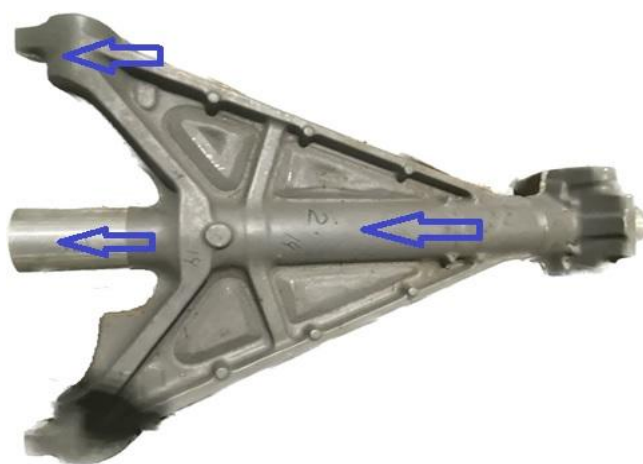
Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе значения свойств выявлены на продольных, поперечных по толщине и поперечных по ширине образцах, вырезанных из исходных заготовок. Типовые варианты термообработки образцов: сплав 1933 – закалка в подогретой воде (75–85 °С) с температуры

470 °С, искусственное старение: 1 ступень – 110 °С, 24 часа, 2 ступень – 180 °С, 10–12 часов; сплав В93пч – закалка в подогретой воде (75–85 °С) с температуры 460 °С, время выдержки 180 минут, искусственное старение: 1 ступень – 120 °С, 8 часов, 2 ступень – 170 °С, 8 часов.



a



б

Рис. 2. Исследуемые авиационные детали:
a – сплав 1933 – траверса;
б – сплав В93пч – рама амортизационной стойки

Установлено, что значения свойств термически обработанных по указанным режимам образцов соответствуют значениям, которые определены нормативными документами (НД). Так, для сплава 1933 предел прочности в разных направлениях поковки лежит в пределах 480–490 МПа (420–530 МПа по НД), относительное удлинение 8,1–17,0 % (не менее 3,0–7,0 % по НД), твердость НВ 149 (не менее НВ110 по НД). Для сплава В93пч: предел прочности лежит в пределах 470–480 МПа (430–500 по НД), относительное удлинение 3,5–11,2 % (не менее 3,0–7,0 % по НД), твердость НВ163 (не менее НВ110 по НД).

Реальный технологический процесс получения авиационных изделий, представленных на рис. 2, является многоэтапным и после завершения операций механической обработки упрочняющая термической обработки проводится на деталях больших размеров и сложной формы, а не на образцах простой формы и малого сечения, как при промежуточной оценке качества заготовок. Исследованиями установлено, что после термической обработки реальных деталей по типовым режимам имеет место несоответствие уровня механических свойств требованиям НД. Сплав 1933: недостаточный уровень (430 МПа и 420 МПа) предела прочности в продольном направлении (по НД – 440–550 МПа) и поперечном по ширине направлении (по НД – 430–530 МПа). Сплав В93пч: слишком высокий уровень предела прочности в продольном направлении – 510 МПа (440–500 МПа по НД) и поперечном по ширине направлении – 510 МПа (430–500 МПа по НД).

Разработаны варианты термической обработки изделий крупных размеров (сплавы В93пч и 1933), которые обеспечивают необходимый уровень механических свойств. Предложены скорректированные режимы ступенчатого старения сплавов. Для сплава 1933: 1 ступень – $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, время выдержки 12 ч.; 2 ступень – $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, время выдержки 6 ч. Для сплава В93пч: 1 ступень – $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, время выдержки 10 ч.; 2 ступень – $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$, время выдержки 10 ч. Данные режимы обеспечивают в продольном и поперечном направлениях по ширине значения предела прочности соответственно 480 и 470 МПа (сплав 1933) и 480 и 480 МПа (сплав В93пч).

На рис. 3 приведена микроструктура сплавов после термической обработки с применением предлагаемых режимов ступенчатого старения. Увеличение длительности старения сплава В93пч привело к появлению в структуре дисперсных выделений упрочняющих фаз.

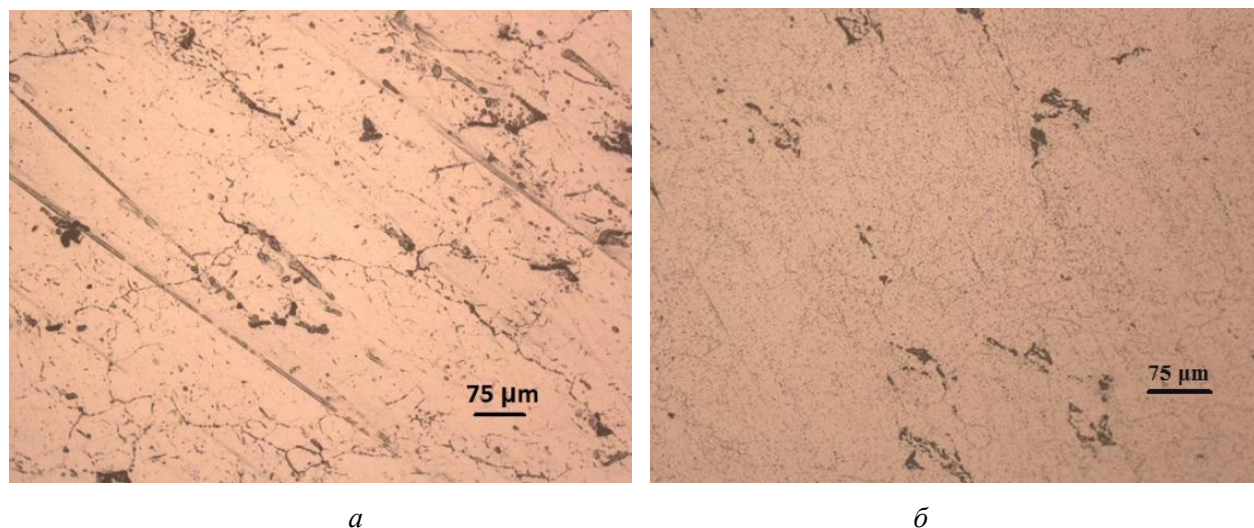


Рис. 3. Микроструктура после термической обработки по предлагаемым режимам сплава 1933 (а) и сплава В93пч (б)

Проведены исследования изменения электропроводности сплавов 1933 и В93пч при реализации обрабатываемых режимов термообработки. Полученные результаты дают возможность проводить оценку величины распада пересыщенного твердого раствора в процессе старения, а также устойчивости коррозионному растрескиванию (КР), что обосновано методикой ТУ 1-804-475-2008. П.1.22. НД регламентируют следующее: требуемая сопротивляемость коррозии полуфабрикатов из сплава 1933 достигается при значениях электропроводности (Υ) $\geq 22,5$ МСм/м (при обработке Т2) и $\geq 23,5$ МСм/м (при обработке Т3); для сплава В93пч уровень электропроводности должен находиться в области 21–25 МСм/м. Электропроводность определялась в самых массивных участках изделия (см. стрелки на рис. 2). Для сплава В93пч электропроводность в состоянии поставки соответствовала уровню 22,7–23,8 МСм/м. Полученные значения электропроводности приведены в табл. 2.

Результаты исследований показывают, что распад пересыщенного твердого раствора обеспечивает увеличение электропроводности, что обусловлено уменьшением концентрации атомов легирующих элементов в кристаллической решетке металла-основы – алюминия. Выявлено, что уменьшенная длительность первой и второй стадий старения при реализации нового режима (сплав 1933) обеспечивают значения электропроводности на уровне полученных при типовой обработке. Это подтверждает весьма высокую степень распада пересыщенного твердого раствора на стадиях старения. Значения электропроводности указывают на достаточную сопротивляемость сплава КР. Электропроводность сплава В93пч после предлагаемых режимов обработки также соответствует НД.

**Электропроводность (МСм/м) сплавов 1933 и В93пч
на различных этапах термической обработки**

| Режим термической обработки | Сплав 1933 | Сплав В93пч |
|-----------------------------|------------|-------------|
| Типовой | | |
| После закалки | 18,5–18,6 | – |
| После 1 ступени старения | 19,6–19,8 | – |
| После 2 ступени старения | 25,1–25,9 | 23,5–25,0 |
| Предлагаемый | | |
| После закалки | 18,5–18,7 | – |
| После 1 ступени старения | 19,6–19,7 | – |
| После 2 ступени старения | 25,2–25,7 | 24,3–25,0 |

Заключение

В процессе термической обработки изделий для самолетов ТУ 214 и SSJ-NEW, получаемых из крупногабаритных заготовок сплава 1933 (поковки) и сплава В93пч (штампованные заготовки), имеют место случаи несоответствия предела прочности сплава в отдельных направлениях волокна изделий – поперечном (по ширине) и продольном.

Для изделий разных конфигурации и габаритов с отличающимися требованиями по механическим свойствам предложен дифференцированный подход к выбору продолжительности ступеней старения. Предложены варианты термической обработки изделий крупных размеров с сокращенной (для сплава 1933), а также увеличенной (для сплав В93пч) выдержкой при температурах ступеней старения, что делает возможным обеспечить заданный уровень механических свойств и характеристик стойкости к коррозионному растрескиванию.

Выполненные исследования особенностей изменения электропроводности сплава 1933 на реализуемых стадиях термической обработки указывают на достаточную степень распада пересыщенного твердого раствора при предлагаемой сокращенной длительности старения, что позволяет достигать требуемых значений прочностных и коррозионных свойств. Рекомендуемое старение большей продолжительности для изделий из сплава В93пч также обеспечивает электропроводность требуемого уровня.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Высокопрочные и сверхпрочные сплавы традиционной системы Al-Zn-Mg-Cu, их роль в технике и возможности развития / О.Г. Сенаторова, В.В. Антипов, А.В. Бронз, А.В. Сомов, Н.Ю. Серебренникова // Технология легких сплавов. – 2016. – № 2. – С. 43–49.
2. Aging behavior and precipitate characterization of a high Zn-containing Al-Zn-Mg-Cu alloy with various tempers / K. Wen, Yu. Fan, G. Wang et al. // Materials & Design. – 2016. – Vol. 101. – Pp. 16–23.
3. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ИНГИБИТОРА КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОГО МОДИФИКАТОРА ИЗ КВАЗИКРИСТАЛЛОВ СИСТЕМЫ Al-Cu-Fe ДЛЯ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ

Парфенов К.В., аспирант, ассистент, Ибатуллин И.Д., д.т.н., профессор

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

Проведено исследование эффективности порошкового модификатора на основе квазикристаллов системы Al-Cu-Fe, разработанного и произведенного ООО «НАНОКОМ», в качестве ингибитора коррозии насосно-компрессорных труб (НКТ) в агрессивной среде, моделируемой раствором NaCl. Экспериментальные испытания выполнены с использованием установки ХАЛ-УЭК-05, воспроизводящей реальные эксплуатационные условия работы НКТ. Установлено, что добавление модификатора в концентрации 0,2 % существенно снижает скорость коррозии металла, обеспечивая степень защиты до 99 %. Проведена оценка эффективности защитного действия ингибитора, а также предложен вероятный механизм протекания коррозионного процесса как в присутствии, так и при отсутствии модификатора. Результаты исследования подтверждают высокую эффективность порошкового модификатора на основе квазикристаллов системы Al-Cu-Fe в предотвращении коррозионного разрушения НКТ. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения данного материала в производственных условиях.

Ключевые слова: насосно-компрессорные трубы, квазикристаллический порошок Al-Cu-Fe, ингибитор коррозии, агрессивная среда, снижение скорости коррозии

INVESTIGATION OF THE PROTECTIVE EFFECT OF A CORROSION INHIBITOR BASED ON A POWDER MODIFIER FROM QUASICRYSTALS OF THE Al-Cu-Fe SYSTEM FOR TUBING

Parfenov K.V., PhD student, assistant,
Ibatullin I.D., Grand PhD in Engineering Sciences, Professor

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

The study assessed the effectiveness of a powder modifier based on Al-Cu-Fe quasicrystals (produced by LLC "NANOCOM") as a corrosion inhibitor for tubing in an aggressive NaCl solution. Tests using the HAL-UEK-05 unit, simulating operational tubing conditions, showed that a 0.2 % concentration of the modifier significantly reduced the corrosion rate, achieving up to 99 % protection efficiency. The effectiveness of the protective effect of the inhibitor was evaluated, and a potential mechanism of the corrosion process with and without the inhibitor was proposed. The high efficiency of the Al-Cu-Fe-based powder modifier underscores its potential for industrial corrosion prevention applications.

Keywords: tubing, quasicrystalline powder Al-Cu-Fe, corrosion inhibitor, aggressive NaCl solution, corrosion rate reduction

Коррозия нефтепромыслового оборудования ежегодно приводит к значительным экономическим потерям, которые, по экспертным оценкам, в нашей стране могут достигать не менее 5 % от валового внутреннего продукта, несмотря на отсутствие официальных данных [1–2]. Ежегодные затраты на коррозию в нефтегазовой отрасли оцениваются примерно в 1,3 миллиарда долларов США, и около 33 % этих расходов (около 463 миллионов долларов США) связаны с внутрискважинной коррозией (насосно-компрессорные трубы (НКТ), пакеры, комплексы нижнего заканчивания скважин и их элементы) и проблемами материалов [3].

В современных условиях наибольшее распространение получил механизированный способ добычи нефти, при котором НКТ, обеспечивающие транспортировку добываемого продукта на поверхность, подвергаются значительному коррозионному воздействию. Интенсивная коррозия является одной из основных причин отказов НКТ в добывающих и нагнетательных скважинах, что приводит к сокращению эксплуатационного ресурса оборудования, многократному увеличению себестоимости добычи и повышению риска экологических и производственных аварий. Основными факторами, способствующими ускоренному разрушению металлов, являются высокая минерализация среды, присутствие хлорид-ионов и кислых газов.

Для предотвращения коррозионного разрушения НКТ традиционно используются ингибиторы коррозии и защитные покрытия, которые эффективно снижают воздействие агрессивных сред. Однако низкие показатели наработки на отказ оборудования подчеркивают необходимость разработки и применения более эффективных средств защиты. В этой связи материалы на основе квазикристаллов, обладающие уникальными физико-химическими свойствами, представляют собой малоизученное, но перспективное направление исследований. Их применение в качестве антикоррозионных средств защиты обладает значительным потенциалом для повышения надежности и долговечности оборудования.

Квазикристаллы представляют собой интерметаллидные соединения с уникальной атомной структурой, характеризующейся наличием осей симметрии 5-го, 8-го, 10-го и 12-го порядков. Известно, что металлы с такой кристаллографической структурой обладают рядом уникальных свойств: высокой твердостью, износостойкостью, антифрикционными характеристиками, низкой теплопроводностью и высокой коррозионной стойкостью. Термин «квази» означает «псевдо», что подчеркивает отсутствие природных аналогов квазикристаллов как по их структуре, так и по свойствам [4].

В данной работе представлены результаты исследования перспектив применения ингибиторов на основе порошкового модификатора из квазикристаллов системы Al-Cu-Fe, разработанных и произведенных ООО «НАНОКОМ», для обеспечения эффективной защиты насосно-компрессорных труб от коррозионного разрушения в агрессивных средах, характерных для условий эксплуатации в нефтегазовой отрасли.

Модификатор, использованный в исследовании, характеризуется пространственной икосаэдрической структурой, что определяет его уникальные свойства. Квазикристаллический порошок применяется в качестве покрытия, способствующего снижению трения и повышению эксплуатационных характеристик материалов. Его отличительными особенностями являются высокая температурная устойчивость, значительная прочность и выдающаяся коррозионная стойкость. Предполагается, что данный материал обладает полупроводниковыми свойствами, что подтверждается снижением электропроводности при повышении температуры, характерным для материалов с подобными характеристиками [5].

Для проведения гравиметрических испытаний и оценки эффективности действия ингибитора коррозионного процесса использована установка ХАЛ-УЭК-05.

На рис. 1 и 2 представлены внешний вид образца после 20 часов контакта с агрессивной средой без введения ингибитора и с его введением. В условиях отсутствия ингибитора поверхность образца покрыта коричневым пористым осадком, визуально напоминающим ржавчину. Осадок характеризуется низкой адгезией и легко удаляется с поверхности. В агрессивной среде с введением ингибитора образец покрыт плотным черным налетом квазикристаллов. Этот налет эффективно блокирует коррозионные процессы, предотвращая контакт агрессивной среды с поверхностью образца и способствуя формированию устойчивой защитной пленки.

Проведена оценка эффективности защитного действия ингибитора, результаты которой представлены на рис. 3.

Эффективность свежеприготовленного ингибитора демонстрирует значительное повышение на начальном этапе применения, однако затем наблюдается снижение. Это связано с отсутствием механизма восполнения концентрации ингибитора в системе и истощением его

ресурса. Установлено, что скорость коррозии стали остается неизменной при увеличении концентрации квазикристаллов в агрессивной среде независимо от их содержания (2,0 г/л или 20 г/л). Предполагается, что квазикристаллы находятся в пассивном состоянии по отношению к агрессивной среде, а образующаяся пленка продуктов коррозии эффективно изолирует поверхность металла даже при интенсивном движении раствора со скоростью до 300 об/мин.



Рис. 1. Внешний вид образца после взаимодействия с агрессивной средой без ингибитора

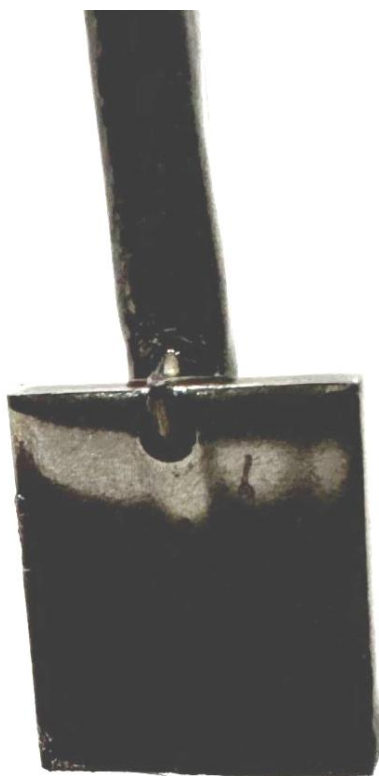


Рис. 2. Внешний вид образца после взаимодействия с агрессивной средой с ингибитором

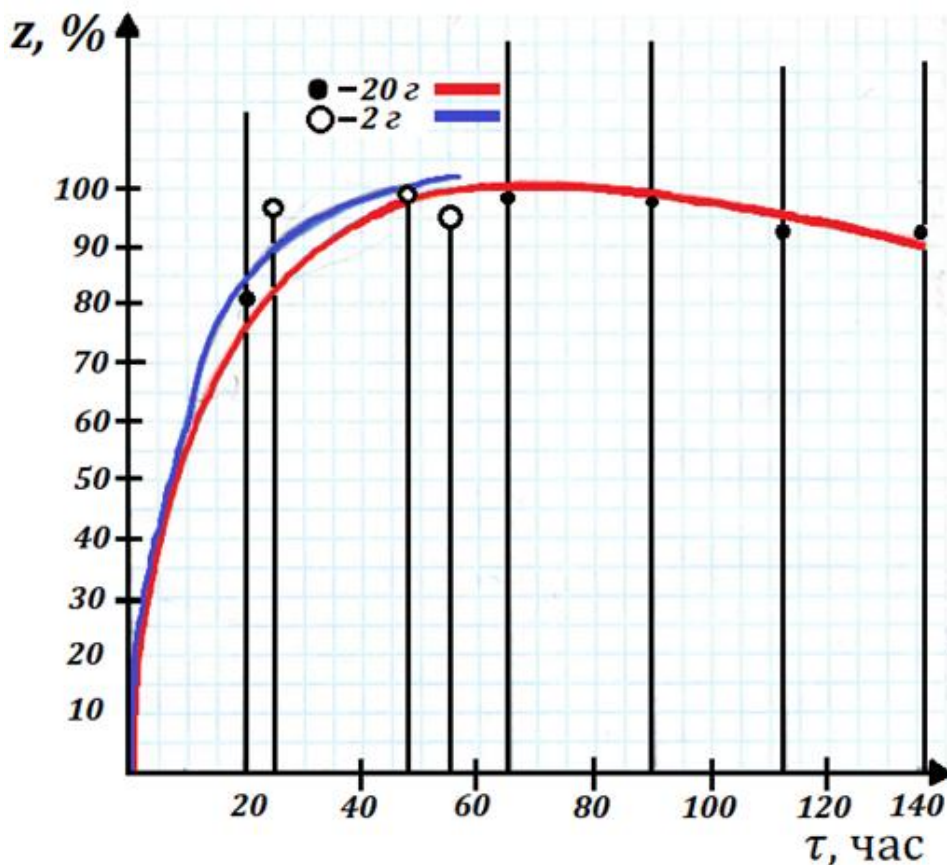


Рис. 3. Защитное действие ингибитора коррозии (порошковый модификатор, основанный на квазикристалле системы Al-Cu-Fe)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности эксплуатации насосно-компрессорных труб в условиях скважин коррозионного фонда / Ж.В. Князева, П.Е. Юдин, С.С. Петров, А.В. Максимук, А.В. Прокудин // Коррозия Территории «Нефтегаз». – 2018. – № 2 (40). – С. 50–54.
2. Ивановский, В.Н. Теоретические основы процесса коррозии нефтепромыслового оборудования / В.Н. Ивановский. – Инженерная практика. – 2010. – № 6. – С. 4–14.
3. Контроль и снижение уровня распространения коррозионных повреждений обсадных и насосно-компрессорных труб в нефтегазовой промышленности / А.С. Кравцов, В.А. Седельникова, К.А. Чижов, А.Э. Князева, И.В. Волков // Московский экономический журнал. – 2021. – № 9. – DOI: 10.24411/2413-046X-2021-10575.
4. Патент № 2740496 С1 Российская Федерация, МПК C22C 21/12, C22C 1/04, B22F 9/02, C22F 1/057. Способ получения квазикристаллического материала; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «НАНОКОМ» (ООО НАНОКОМ) / Абузин Ю.А., Неяглов О.С., Филиппов Д.А.; № 2020118803; заявл. 08.06.2020; опубл. 14.01.2021; Бюл. № 2.
5. Векилов, Ю.Х. Квазикристаллы. Структура и свойства / Ю.Х. Векилов, Э.И. Исаев // Кристаллография. – 2007. – Т. 52. – № 6. – С. 966–972.

ИССЛЕДОВАНИЕ 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., аспирант, Майдан Д.А., доцент, к.т.н., доцент

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

Проведены анализ горения систем типа $\text{Si}_x+\text{Ti}+6\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$, а также рентгенофазовые и микроструктурные анализы продуктов реакций. В результате 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, керамическая композиция, синтез

INVESTIGATION 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., PhD student,
Maidan D.A., Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

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

In this work, an analysis of the combustion of systems of the type $x\text{Si}+\text{Ti}+6\text{NaN}_3+\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6+(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ was carried out. X-ray phase and microstructural analyses of the reaction products were performed. As a result, it was concluded that the desired ceramic composite $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ can be obtained by the azide SHS (self-propagating high-temperature synthesis) method.

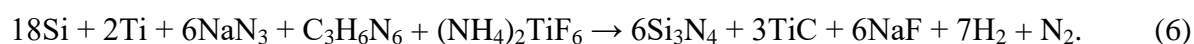
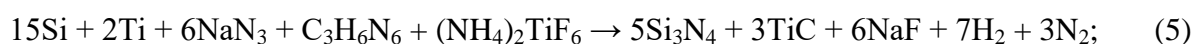
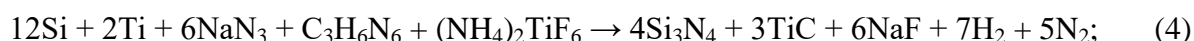
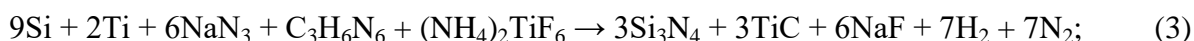
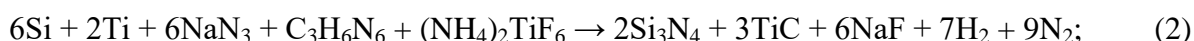
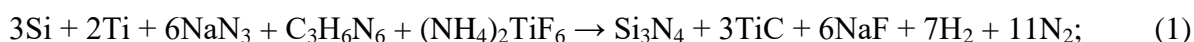
Keywords: silicon nitride, titanium carbide, ceramic composition, synthesis

Сочетание нитрида кремния (Si_3N_4) и карбида титана (TiC) является перспективным материалом для применения в высокотехнологичных сферах, так как он обладает уникальными физическими и механическими свойствами. Нитрид кремния имеет ряд отличительных особенностей: высокую термостойкость, химическую стойкость и отличную износостойкость. Это делает его идеальным материалом для работы в экстремальных условиях. Карбид титана улучшает механические характеристики композиции, такие как высокая твердость и износостойкость, а также повышает теплопроводность и прочность при высоких температурах. Помимо вышеупомянутых свойств карбид титана снижает электросопротивление композиции, что дает возможность обрабатывать данный материал методом электронной эрозии. Изделия, получаемые таким способом обработки, могут иметь форму сложной конфигурации, при этом исключается фактор износа дорогостоящих расходников, как, например, при механической обработке [1].

Существует несколько методов получения керамических композиций на основе $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$, таких как спекание при высоком давлении, горячее изостатическое спекание, реакционное плазменное напыление. Однако данные методы имеют свои ограничения: они требуют значительных энергетических затрат, сложного оборудования и не всегда обеспечивают равномерное распределение фаз в конечном продукте. Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза выделяется среди них благодаря своей экономичности, скорости процесса, чистоте конечных продуктов и способности формировать однородные по структуре композиты без необходимости применения специального дорогостоящего оборудования [2, 3].

Отличительной чертой данного исследования является замена традиционного карбидообразующего реагента в виде технической сажи (С) на меламин (С₃Н₆Н₆). Этот выбор обусловлен поиском новых, более эффективных источников углерода при синтезе керамических композиций методом СВС-Аз. Поскольку при нагревании меламин термически разлагается на источники углерода и азота, он выполняет функции не только источника углерода, но и азотирующего компонента, что приводит к увеличению количества молей азота в реакции. Эта особенность способствует увеличению полноты протекания реакции, особенно внутри шихты. Схожими азотирующими функциями обладает азид натрия NaN₃, который является неотъемлемой частью азидного СВС [4].

Перед экспериментальным синтезом были проведены термодинамические расчёты потенциальных систем и в результате рассматривались только те системы, в которых адиабатические температуры реакции были достаточны для их самопроизвольного протекания в форме горения. Экспериментально были исследованы следующие реакции:



В результате практических экспериментов были выявлены наиболее перспективные реакции (3) и (4), в которых количество молей кремния в исходных компонентах равнялось 9 и 12 соответственно.

Рентгенограммы продукта, а также фото морфологии частиц керамических композиций представлены на рис. 1–4.

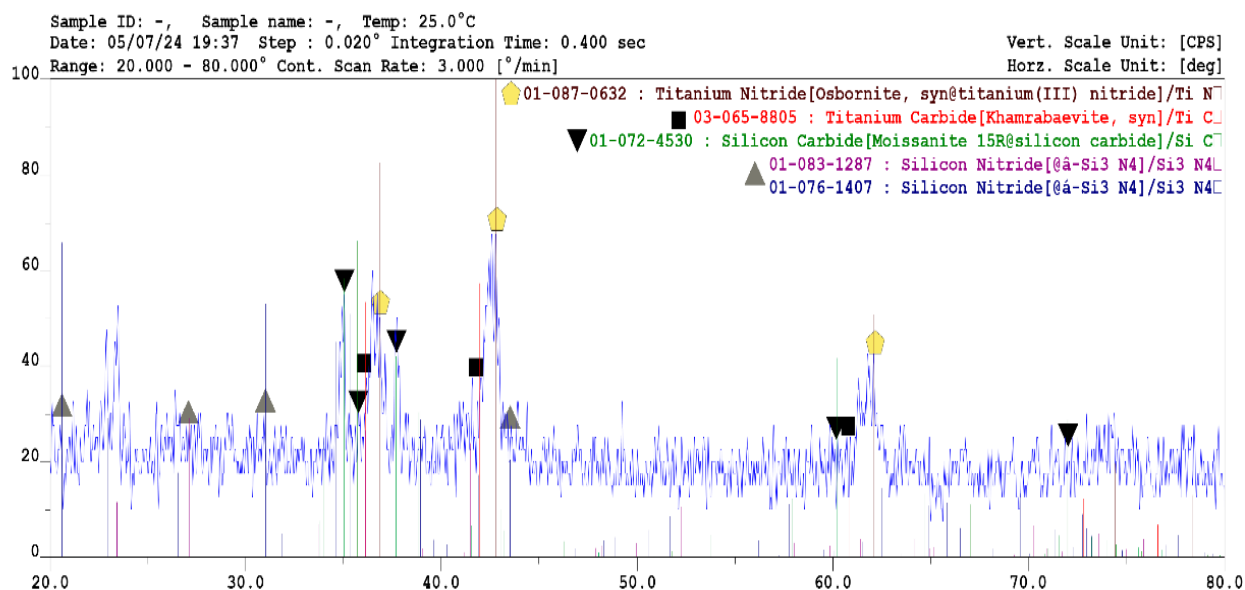


Рис. 1. Рентгенограмма продукта, полученная при сжигании шихты, состоящей из $9\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$

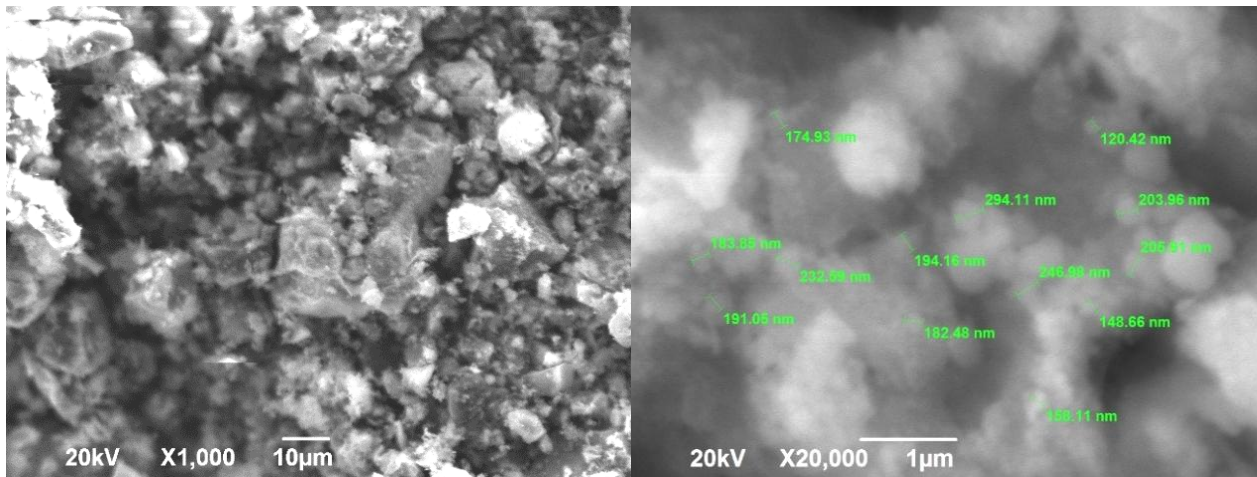


Рис. 2. Морфология частиц керамической композиции, полученной в результате реакции исходных компонентов $9\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$

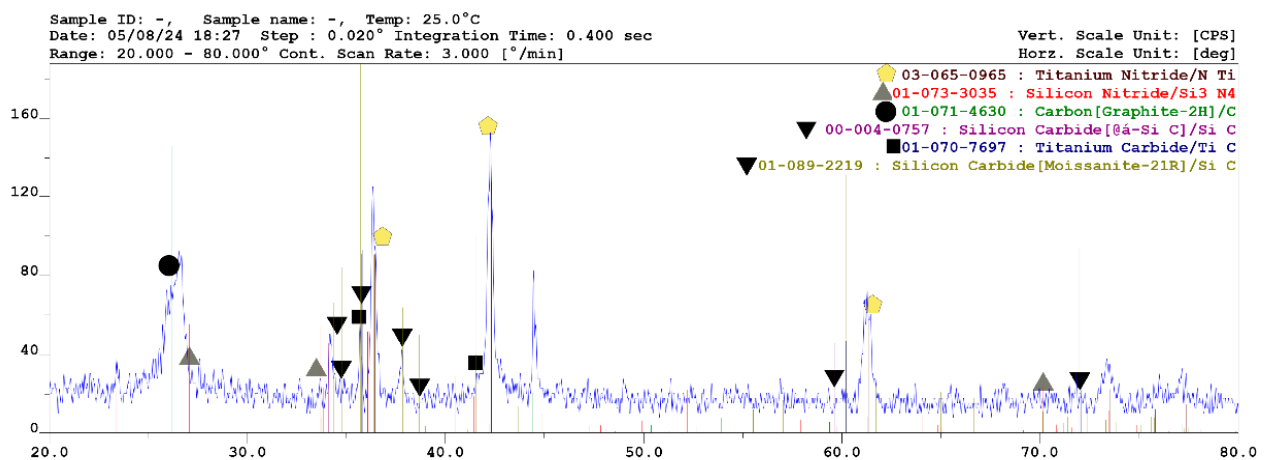


Рис. 3. Рентгенограмма продукта, полученная при сжигании шихты, состоящей из $12\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$

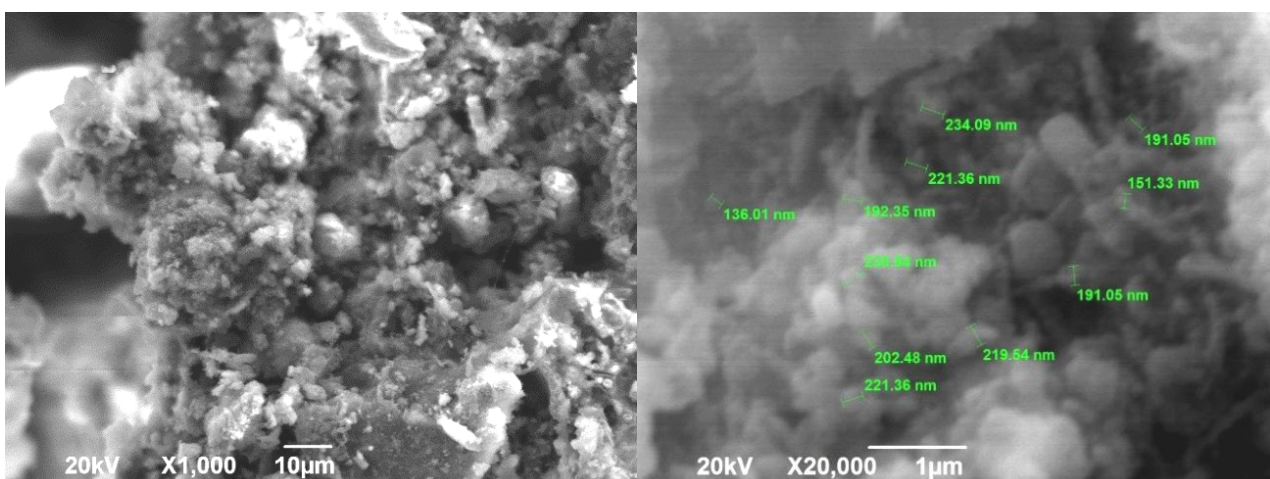


Рис. 4. Морфология частиц керамической композиции, полученной в результате реакции исходных компонентов $12\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$

Рентгенофазовой анализ не подтвердил присутствия композиции, сочетающей нитрид кремния и карбид титана ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$). Вместе с тем были обнаружены смеси, содержащие

в себе не только нитрид кремния (Si_3N_4) и карбид титана (TiC), но и карбид кремния (SiC) и нитрид титана (TiN). Такое сочетание керамических фаз является примечательным, поскольку ни одно теоретическое исследование, проводимое перед данным экспериментальным синтезом, не предполагало таких результатов. На изображениях морфологии частиц можно наблюдать как игольчатые, так и сферические структуры, размер которых колеблется в диапазоне от 140 до 250 нанометров, что типично для данного состава веществ. При этом содержание углерода в составе является минимальным, что говорит о полноте протекания реакции и распаде меламина ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$) на более простые углеводороды. Данные о составах продуктов остальных реакций представлены в таблице.

Фазовый состав продуктов горения реакций (1)–(6)

| Система | Фазовый состав продуктов горения |
|---|--|
| $3\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ | TiN , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ |
| $6\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ | TiN , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ |
| $9\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ | TiN , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, TiC , SiC |
| $12\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ | TiN , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, TiC , SiC , C |
| $15\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ | TiN , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, TiC , SiC , NaF , Si |
| $18\text{Si} + 2\text{Ti} + 6\text{NaN}_3 + \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6 + (\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ | TiN , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, TiC , SiC , NaF , Si |

Здесь наблюдается схожая картина. Во всех рассмотренных случаях в продуктах реакции либо нет искомой композиции $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$, либо она есть, но с присутствием других керамических фаз. Отдельный интерес вызывают реакции (1) и (2), в продуктах которых вообще не выявлено присутствие карбидных фаз или углерода. Полученные экспериментальные данные значительно отличаются от теоретически рассчитанных механизмов протекания реакции синтеза.

Есть несколько теорий, которые объясняют полученные экспериментальные данные: недостаточная температура реакции, конкуренция между фазами и побочные продукты реакции разложения меламина. Всё это может объяснить наблюдаемые расхождения между теоретическими расчетами и практическими результатами.

Формирование карбида титана (TiC) является высокоэнергетическим процессом, требующим строгого соблюдения термодинамических условий. Теоретически TiC должен образовываться при температурах выше 1200–1300 °С за счет прямого взаимодействия титана с углеродом. Однако экспериментальные данные показывают, что TiC появляется лишь в реакциях с высоким содержанием кремния (3–6), а в системах с малым количеством кремния (1–2) он вообще не обнаруживается. Это может быть связано с недостаточной пиковой температурой процесса синтеза, что сходится с теоретическими расчётами, поскольку в системах (1) и (2) самые низкие адиабатические температуры реакции – порядка 2200–2400 °С. Этой температуры должно быть достаточно для синтеза TiC , однако на практике она могла быть ниже из-за нескольких факторов: неоднородности смеси, потерь тепла через вынос продуктов разложения меламина (NH_3 , N_2 , HCN) из зоны реакции и высокой теплопередачи реактору.

Кроме влияния температуры, формирование желаемой керамической композиции $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ существенно затрудняется конкуренцией между фазами. Основным конкурентом TiC является нитрид титана (TiN), который имеет значительно более низкую энтальпию образования. Эта особенность заметна во всех экспериментальных результатах, поскольку TiN обнаружен во всех исследованных системах. Высокое содержание азота в исходной смеси (NaN_3 , NH_4TiF_6 , $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$) создает благоприятные условия для формирования TiN , поскольку при более низких температурах (например, при остывании продуктов) скорость диффузии азота в титан значительно выше, чем скорость диффузии углерода, что делает TiN более

вероятным продуктом реакции. Кремний, реагирующий с азотом, преимущественно образует α - Si_3N_4 , которая доминирует в продуктах горения. Особенно это заметно в системах с низким содержанием кремния (1–2), где единственными выявленными фазами являются TiN и α - Si_3N_4 .

Третья ключевая проблема связана с возможными побочными реакциями меламина ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$), которые существенно осложняют протекание основных процессов. Разложение меламина при высоких температурах сопровождается образованием газообразных продуктов (NH_3 , N_2 , HCN), которые легко улетучиваются из фронта горения системы. Однако при недостаточной температуре эти процессы могут протекать неполноценно, что приводит к частичному разложению меламина и снижению выхода доступного углерода. Продукты разложения меламина, такие как HCN, могут реагировать с NaN_3 , образуя новые азотосодержащие соединения. Это увеличивает концентрацию азота в системе и способствует преобладанию TiN над TiC. Углерод, выделяющийся при разложении меламина, может оставаться в виде инертных форм (графита или аморфного углерода), что снижает его участие в основных реакциях. Высокая летучесть продуктов разложения меламина приводит к потере значительной части углерода из системы до завершения реакции, что критично для формирования TiC.

Все вышеописанные объяснения полученных экспериментальных результатов являются лишь гипотезами, правдивость которых сложно доказать из-за сложности и многогранности процессов, протекающих во время синтеза за короткий промежуток времени. Однако, пусть и не в полном объёме, они объясняют полученные результаты.

Выводы

В результате экспериментальных исследований композиция Si_3N_4 -TiC не была получена в чистом виде. В продуктах наиболее перспективных реакций наблюдается присутствие побочных керамических фаз в виде карбида кремния (SiC) и нитрида титана (TiN). Полученные результаты экспериментального исследования значительно разнятся с теоретическими расчётами. Механизмы данного феномена нуждаются в дополнительном исследовании, однако уже можно сделать вывод о перспективности данного метода получения искомой керамической композиции Si_3N_4 -TiC.

Проведение дальнейших исследований в этом направлении предполагает установление механизмов образования побочных фаз; поиск новых источников углерода и подбор новых оптимальных реакции; исследование количественного состава фаз уже полученных композиций; поиск возможности практического применения композиции Si_3N_4 -TiN-TiC-SiC.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амосов, А.П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учебное пособие / А.П. Амосов, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 568 с.
2. Чухломина, Л.Н. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных нитридосодержащих керамических материалов / Л.Н. Чухломина, Ю.М. Максимов, В.И. Верещагин. – Новосибирск: Наука, 2012. – 260 с.
3. Bichurov, G. The Use of Halides in SHS Azide Technology / G. Bichurov // Int. J. Self-Propagating High-Temp Synth. – 2000. – Vol. 9. – No. 2. – Pp. 247–268.
4. Титова, Ю.В. СВС керамической нитридно-карбидной композиции Si_3N_4 -TiC с использованием азиды натрия / Ю.В. Титова, А.Ф. Якубова, А.В. Шоломова // Современные материалы, техника и технологии. – 2022. – № 5. – С. 28–33.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОРИЕНТИРОВОК В ПРОЦЕССЕ ОТБОРТОВКИ

Полегешко С.А.¹, ведущий инженер, **Ерисов Я.А.**^{1,2}, д.т.н., доцент, главный научный сотрудник, **Клепов Д.Н.**¹, младший научный сотрудник, **Арышенский Е.В.**¹, д.т.н., доцент, главный научный сотрудник

¹ *Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Российская Федерация*

² *Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва,
г. Самара, Российская Федерация
E-mail: asaysis3d@gmail.com*

Рассматривается моделирование изменения кристаллографических ориентировок в процессе отбортовки. Отбортовка является важным процессом в металлургии, влияющим на структуру и свойства материалов. Исследование направлено на понимание механизмов изменения кристаллографических ориентировок под воздействием механических и термических нагрузок. В работе используются современные методы численного моделирования и экспериментальные данные для анализа динамики изменения ориентировок кристаллических решеток. Полученные результаты позволяют оптимизировать процесс отбортовки для достижения желаемых свойств материалов, что имеет важное значение для промышленного применения.

Ключевые слова: холодная листовая штамповка, вращение кристаллической решетки, кристаллическая пластичность, математическое моделирование

MODELING OF CHANGES IN CRYSTALLOGRAPHIC ORIENTATIONS DURING FLANGING

Polegshko S.A.¹, lead engineer, **Yerisov Ya.A.**^{1,2}, Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Chief researcher, **Klepov D.N.**¹, junior researcher, **Aryshensky E.V.**¹, Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Chief researcher

¹ *Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation*

² *Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
Samara, Russian Federation
E-mail: asaysis3d@gmail.com*

In this paper, modeling of changes in crystallographic orientations during flanging is considered. Flanging is an important process in metallurgy that affects the structure and properties of materials. The research is aimed at understanding the mechanisms of changing crystallographic orientations under the influence of mechanical and thermal loads. The work uses modern numerical modeling methods and experimental data to analyze the dynamics of changes in the orientations of crystal lattices. The results obtained make it possible to optimize the flanging process to achieve the desired material properties, which is important for industrial applications.

Keywords: cold sheet stamping, crystal lattice rotation, crystal plasticity, mathematical modeling

Современные технологии обработки материалов играют ключевую роль в создании высококачественных и надежных изделий, особенно в таких отраслях, как аэрокосмическая, автомобильная и машиностроительная промышленность. Одним из важнейших процессов, используемых для производства изделий из металлических материалов, является холодная листовая штамповка – метод пластической деформации, позволяющий получать изделия с высокой точностью и сложной геометрией [1]. Алюминиевые сплавы благодаря своим уникальным свойствам, таким как низкая плотность, высокая прочность и коррозионная стойкость, являются одними из наиболее востребованных материалов для таких применений.

Однако процесс штамповки алюминиевых сплавов сопровождается сложными физическими явлениями, одним из которых является изменение кристаллографических ориентировок в материале. В процессе деформации кристаллическая структура материала может изменять свою ориентацию, что существенно влияет на его механические свойства и конечную форму, а также может приводить к разрушению, искажению формы и размеров изделий, разнотолщинности и фестонообразованию, что является основной причиной повышенной доли отходов при холодном формообразовании [2, 3]. Понимание и моделирование изменения кристаллографических ориентировок в процессе штамповки является критически важным для оптимизации технологических параметров и повышения качества конечных продуктов.

Целью данного исследования является моделирование эволюции кристаллографической ориентировки в процессе отбортовки, что ранее не исследовалось.

Отбортовка – операция, в результате которой по внутреннему (отбортовка отверстий) или наружному (внешняя отбортовка) контуру заготовки образуется бурт. Отбортовка отверстий широко используется в производстве, заменяя часто операции вытяжки с последующей вырубкой дна [4].

Моделирование проводилось исходя из следующих положений: деформация монокристалла условно разбита на два этапа. На первом происходит пластическая деформация путем скольжения по кристаллографическим плоскостям, на втором – поворот кристаллической решетки без деформации [5].

Расчет процесса отбортовки для точек на равном расстоянии от края пуансона и края отверстия в заготовке в направлении прокатки и под углом 45 градусов к направлению прокатки (рис. 1), уравнение связи напряжений и деформаций принималось в соответствии с [6].

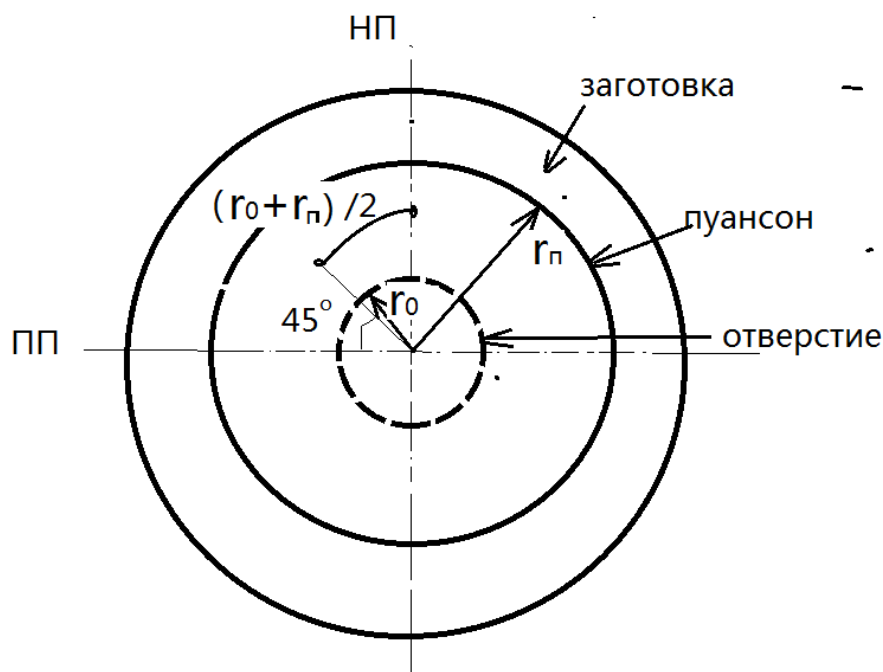


Рис. 1. Схема расчета отбортовки

Градиент деформации образца G может быть разложен на пластическую деформацию $\bar{\varepsilon}_p^G$ и поворот \bar{w}^G , а градиент деформации кристаллита – на пластическую деформацию $\bar{\varepsilon}^P$, поворот решетки вследствие скольжения \bar{w} и фактический поворот решетки R .

Таким образом, принимая предположение Тейлора о равенности градиента деформации образца градиенту деформации кристаллита [7], имеем уравнение для расчета матрицы поворота R :

$$\bar{\varepsilon}_p^G + \bar{w}^G = R + \bar{\varepsilon}^P + \bar{w} . \quad (1)$$

Но так как $\bar{\varepsilon}_p^G = \bar{\varepsilon}^p$, то

$$R = \bar{w}^G - \bar{w} . \quad (2)$$

Если задавать текстурные ориентировки с помощью матрицы направляющих косинусов g_{ij} [8], что равносильно заданию индексов Миллера, то новые их значения рассчитываются как

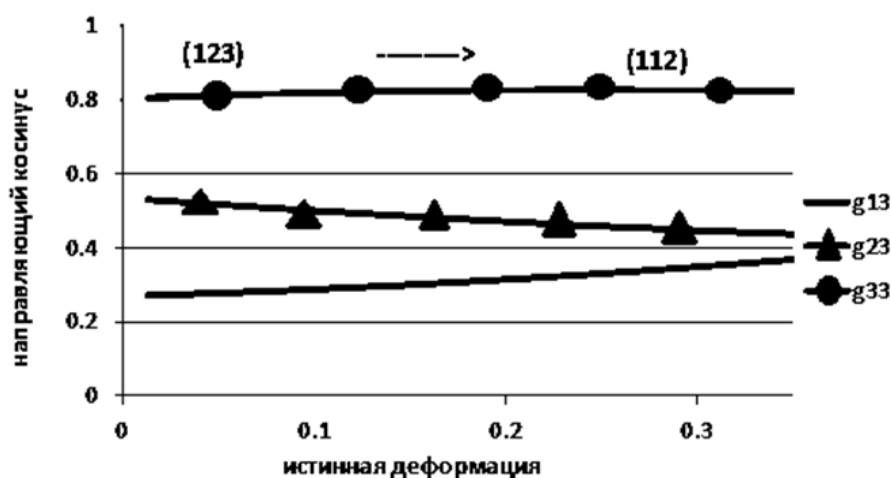
$$g'_{ij} = (\delta_{ik} + R_{ik})g_{kj} , \quad (3)$$

где δ_{ik} – символ Кронекера;

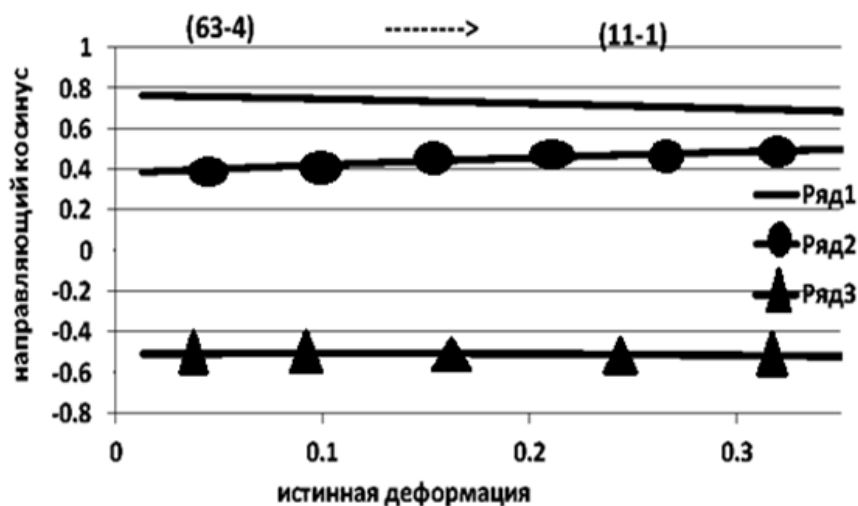
g_{kj} – матрица косинусов в начале шага;

g'_{ij} – матрица косинусов, получившаяся в результате, которую можно преобразовать обратно в индексы Миллера или углы Эйлера.

Рис. 2, а и рис. 2, б показывают соответственно изменения нормали и направления для начальной ориентировки S {123}<63-4> (углы Эйлера ϕ_1 Φ_2 , соответственно, равны 60, 35 и 65 градусов) при отбортовке в направлении прокатки.



а



б

Рис. 2. Изменение ориентировки кристаллита с ориентацией S текстуры при отбортовке в направлении прокатки:

а – нормаль к плоскости кристаллита параллельной плоскости прокатки;

б – направление кристаллической решетки, совпадающее с направлением прокатки

При достижении истинной деформации 0,3 ориентировка сменилась на $\{112\}\langle 11-1 \rangle$. Поворот кристаллической решетки вокруг направления прокатки отсутствует, а компоненты g_{13} и g_{23} (g_{31} и g_{32}) стремятся к схождению по мере развития деформации.

Результаты отбортовки материала с начальной текстурой куба демонстрируют стабильность данной компоненты в процессах штамповки, что может говорить о том, что сохранение данной компоненты наиболее энергетически выгодно.

Выводы

Было проведено моделирование процесса отбортовки алюминиевых сплавов, в ходе которого определено, как изменяются кристаллические ориентировки на протяжении деформации. Выявлено, что при схеме деформации, присущей отбортовке, наиболее энергетически выгодной текстурой является текстура куба.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00590, <https://rscf.ru/project/24-19-00590/>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lim, Y. Process Control for Sheet-Metal Stamping. *Advances in Industrial Control* / Y. Lim, R. Venugopa, A.G. Ulsoy. – 2014. – DOI: 10.1007/978-1-4471-6284-1.
2. Ерисов, Я.А. Компьютерное моделирование влияния идеальных кристаллографических ориентировок на фестонообразование при вытяжке / Я.А. Ерисов, С.В. Сурудин, А.Т. Тиабашвили, Ф.В. Гречников // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 3 (72). – С. 6–14. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-6-14.
3. Telkanov, Michael. Modeling of crystal lattice rotations with the description of grain fragmentation under intensive inelastic deformation / Michael Telkanov, Pavel Volegov. – 2016. – Vol. 1783. – 020224. – DOI: 10.1063/1.4966518.
4. Бурдуковский, В.Г. Технология листовой штамповки: учебное пособие / В.Г. Бурдуковский. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 224 с.
5. Изучение эволюции кристаллографической текстуры при вытяжке низколегированного алюминиевого сплава / Е.В. Арышенский, С.В. Коновалов, И.А. Латушкин, М.А. Лапшов // *Цветные металлы*. – 2022. – № 5. – С. 60–66. – DOI: 10.17580/tsm.2022.05.08. – EDN BNTXPL.
6. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г.А. Смирнов-Аляев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1978. – 368 с.
7. Taylor, G.I. The Mechanism of Plastic Deformation of Crystals / G.I. Taylor, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, London. – 1934. – Vol. A145. – Part I. – Pp. 362–387; part II. – Pp. 362–387.
8. Engler, Olaf. Introduction to texture analysis: macrotexture, microtexture, and orientation mapping / Olaf Engler, Valerie Randle. – 2nd ed.

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ ГРУППЫ АЛТЭК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Полегешко С.А., ведущий инженер, **Левагина А.А.**, младший научный сотрудник, **Кульковец В.А.**, магистрант, **Коновалов С.В.**, д.т.н., профессор, **Арышенский Е.В.**, д.т.н., доцент

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Российская Федерация
E-mail: asaysis3d@gmail.com*

Материалы на основе алюминия приобретают всё большее применение в промышленности. Это в том числе относится и к электротехнике, где, несмотря на более низкую удельную электропроводность, алюминий успешно конкурирует с медью. Это связано в том числе и с увеличением стоимости медных проводов, а также необходимостью уменьшения веса продукта. У алюминиевых проводов есть ещё один весомый недостаток – это низкий предел прочности. Провода алюминиевого сплава группы АЛТЭК позволяют достичь высоких прочностных свойств и термостойкости. Но для использования этих сплавов в промышленности ещё не разработаны технологические режимы производства и не исследовано влияние термомеханической обработки на формирование улучшенных механических свойств. В СибГИУ ведутся исследования влияния термомеханической обработки сплавов АЛТЭК на формирование в них комплекса улучшенных физико-механических свойств.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, проволока, технологические режимы производства, удельная электропроводность

CHANGING THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALTEK GROUP ALLOYS DEPENDING ON THERMOMECHANICAL TREATMENT

Polegshko S.A., lead engineer, **Levagina A.A.**, junior researcher, **Kulkovets V.A.**, Master's Degree student, **Konovalev S.V.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, **Aryshensky E.V.**, Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation
E-mail: asaysis3d@gmail.com*

Aluminum-based materials are increasingly used in industry. This also applies to electrical engineering, where despite its lower specific electrical conductivity, aluminum successfully competes with copper. This is due, among other things, to the increased cost of copper wires, as well as the need to reduce the weight of the product. Aluminum wires have another significant drawback, which is their low tensile strength. Aluminum alloy wires of the ALTEK group allow achieving high strength properties and heat resistance. But for the introduction of these alloys into industry, technological production modes have not yet been developed and the effect of thermomechanical treatment on the formation of increased mechanical properties has not been studied. The SibSIU is conducting research into the effect of thermomechanical treatment of ALTEK alloys on the formation of a complex of increased physical and mechanical properties in them.

Keywords: aluminum alloy, wire, technological modes of production, specific electrical conductivity

На данный момент остаётся актуальным вопрос об использовании алюминиевых проводов в современной электротехнической промышленности [1, 2, 3]. Для этого необходимо, чтобы алюминиевые сплавы, использующиеся в качестве материала для проводов, обладали комплексом таких свойств, как повышенные предел прочности, коррозионная стойкость, термостойкость и электропроводность. Сплавы группы АЛТЭК способны удовлетворять этим требованиям. Кроме того, у сплавов данной группы из производственного цикла могут

быть исключены такие технологические операции, как гомогенизация и закалка. Не смотря на большой объем работы, проделанной профессором Н.А. Беловым и его учениками по исследованию сплавов группы АЛТЭК, многие связанные с ними вопросы остаются слабоизученными. Удалось получить достаточно хорошие результаты по электропроводности, пределу прочности в данной группе. Один из таких технологических режимов термомеханической обработки оказывает влияние на формирование в них физико-механических свойств. Целью данного исследования является изучение формирования физико-механических свойств при волочении алюминиевых сплавов группы АЛТЭК [4].

Для изучения было выбрано два сплава группы АЛТЭК с добавлением циркония (2003, 2004) и без добавления циркония (2001, 2002) химический состав которых представлен в таблице. Слитки с данным химическим составом были изготовлены в печи Xtoki.

Химический состав изготовленных образцов

| Сплав | Cu | Mn | Fe | Si | Zr | Al | Кокиль | T литья, °С |
|-------|------|------|------|------|------|-------|----------|---------------|
| 2001 | 2.01 | 2.06 | 0.07 | 0.04 | 0 | 95.82 | стальной | 730–760 |
| 2002 | 2.01 | 2.06 | 0.07 | 0.04 | 0 | 95.82 | медный | 730–760 |
| 2003 | 1.52 | 1.53 | 0.08 | 0.05 | 0.34 | 96.48 | стальной | 770–800 |
| 2004 | 1.52 | 1.53 | 0.08 | 0.05 | 0.34 | 96.48 | медный | 770–800 |

После литья слитки прокатывались на стане до толщины 5 мм и разрезались на заготовки с размерами 5×7 мм. Полученные образцы прокатывались до размера 2,5×2,5 мм на прокатном стане и после протягивались через фильеру до диаметра 2,2 мм. Далее полученная проволока подвергалась отжигу в диапазоне температур от 300 до 500 °С с шагом в 50 °С. Затем отбирались образцы для испытания на предел прочности и электропроводность. Данные по электропроводности представлены на рис. 1.

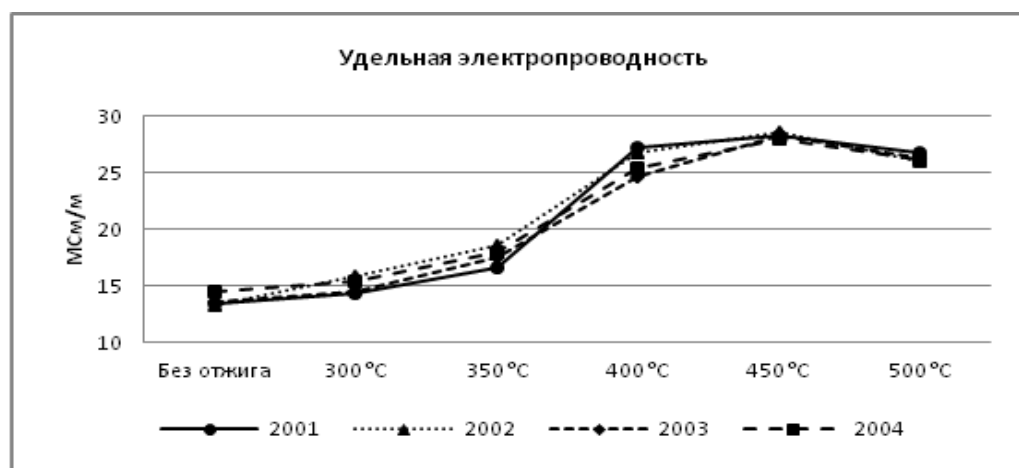


Рис. 1. Удельная электропроводность опытных образцов диаметром 2,2 мм после отжигов в диапазоне температур от 300 до 500 °С в течение 3 часов

Во всех случаях образцы после волочения показали примерно одинаковый уровень удельной электропроводности в пределах от 13,5 до 14,5 МСм/м. При повышении температуры термической обработки с 300 до 450 °С для всех исследуемых сплавов происходит стабильный рост удельной электропроводности, что скорее всего связано с выделением фазы $Al_{20}Cu_2Mn_3$. При отжиге в 500 °С удельная электропроводность сплавов падает до 26 МСм/м что может быть объяснено растворением фазы Al_2Cu .

По результатам проведения испытаний на удельную электропроводность можно сделать вывод, что разный материал кокиля при литье не привнес больших изменений, поэтому на рис. 2 представлены две плавки в стальной кокиль с содержанием циркония и без такового.

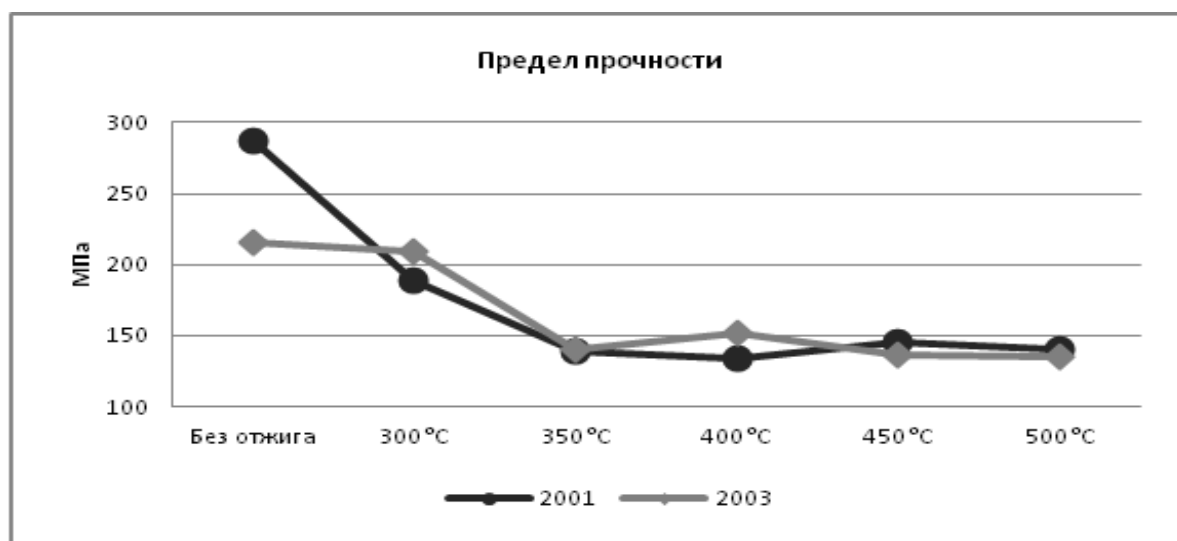


Рис. 2. Результаты предела прочности для проволоки диаметром 2,2 мм при отжигах от 300 до 500 °C в течение 3 часов

Сплавы после стадии волочения показали высокий предел прочности: 287 МПа для сплава без циркония и 216 МПа с добавлением циркония. После отжига в 300 °C предел прочности снижается и стабилизируется после температуры отжига 350 °C и находится в пределах от 130 до 150 МПа. Стабильность прочностных свойств может быть объяснена наличием дисперсоидов $Al_{20}Cu_2Mn_3$, Al_3Zr , препятствующих движению дислокации и предотвращающих разупрочнение сплавов в результате возврата и рекристаллизации.

Выводы

Было изучено влияние технологических параметров термомеханической обработки алюминиевой проволоки, изготовлены опытные образцы из сплавов систем Al-Cu-Mn (2001, 2002) и Al-Cu-Mn (Zr) (2003, 2004). Получены результаты влияния температуры отжига на электропроводность и предел прочности. Самый высокий показатель удельной электропроводности сплавов АЛТЭК был зафиксирован после отжига в 450 °C и доходит до значения в 28 МСм/м. Предел прочности начиная с температуры отжига в 350 °C перестаёт резко понижаться, оставаясь примерно на том же уровне, что говорит о термостабильности сплавов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00064, <https://rscf.ru/project/24-19-00064/>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Koch, S. Aluminum alloys for wire harnesses in automotive engineering / S. Koch, H. Antrekowitsch // BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. – 2007. – Vol. 152. – No. 2. – Pp. 62–67.
2. High-Strength Aluminum Wires for Low-Voltage Automotive Engine Wiring Harnesses / K. Taguchi et al. // SEI Tech. Rev. – 2017. – Vol. 84. – Pp. 125–130.
3. Fracture Mechanisms and Mechanical Performance of Aluminum Conductor Alloy Reinforced Wires in High-Voltage Transmission Lines / Y. Wang et al. // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2024. – Pp. 1–15.
4. Phase composition and mechanical properties of Al–1.5 % Cu–1.5 % Mn–0.35 % Zr (Fe, Si) wire alloy / N.A. Belov et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 782. – Pp. 735–746.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЛАТУНИ ЛМцАЖКС

Святкин А.В., к.т.н., доцент, Кондратьева Л.П., студент

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Российская Федерация

E-mail: astgl@mail.ru

Рассмотрено влияние скорости охлаждения на микроструктуру и твердость специальной латуни ЛМцАЖКС (CuZn13Mn8Al5Si2Fe1Pb). Изучено поведение сплава после закалки и последующего старения в водополимерном растворе. Полученный результат сравнили с закалкой сплава в воде и на воздухе. При использовании в качестве охлаждающей среды водополимерного раствора обеспечивается отсутствие значимых короблений и твердость на уровне закалки в воде.

Ключевые слова: водополимерный раствор, скорость охлаждения, микроструктура латуни, линии скольжения, мартенситное превращение, метастабильные выделения

EFFECT OF COOLING RATE ON THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF SPECIAL BRASS CuZn13Mn8Al5Si2Fe1Pb

Svyatkin A.V., PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Kondratieva L.P., student

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

E-mail: aleksey.svyatkin@vaz.ru

The effect of cooling rate on the microstructure and hardness of special brass CuZn13Mn8Al5Si2Fe1Pb is considered. The behavior of the alloy after quenching and subsequent aging in a water-polymer solution was studied. The result obtained was compared with quenching of the alloy in water and in air. When using a water-polymer solution as a cooling medium, the absence of significant warping and maximum hardening are ensured.

Keywords: water-based polymer solution, cooling rate, brass microstructure, slip bands, martensitic transformation, metastable precipitates

Сплав ЛМцАЖКС 70-7-5-2-2-1 (далее ЛМцАЖКС) представляет собой трёхфазную ($\alpha+\beta$)-латунь, упрочнённую силицидами. Исследования влияния закалки сплава в воде показали перспективность данного направления [1]. За счёт образования структуры мартенситного типа и выделения при старении наноразмерных силицидов можно добиться повышения твердости на 60 % – до 350 НV. Ранее было показано, что $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение происходит кристаллографически упорядоченным образом и подчиняется соотношениям ориентации Курдюмова – Сакса [3]. При охлаждении сплава в воде происходит распад высокотемпературной β -фазы по бездиффузионному (мартенситному) типу с образованием крупнопластинчатых выделений α_2 -фазы. После отпуска свыше 175 °С отмечено образование пластин бейнитного типа. В работе [4] показано увеличение износостойкости колец синхронизаторов при закалке в воде в интервале температур 750–800 °С и отсутствие эффекта при закалке от 700 °С. Известно, что для сплава ЛМцАЖКС 710 °С является критической точкой перехода в твердого раствора в однофазное β -состояние [5]. Таким образом, заметного увеличения износостойкости ($\alpha+\beta$)-латуни можно добиться только закалкой из однофазной области. Однако при значительном увеличении твердости снижается способность к обработке лезвийным инструментом, что сказывается на качестве поверхности обработанных деталей и стойкости режущего инструмента. Препятствием для технологического применения закалки в воде являются значительные коробления изделий, возникающие в процессе обработки.

В этой связи целью настоящего исследования является поиск альтернативных охлаждающих сред, способствующих снижению деформаций в процессе закалки, обеспечивая сохранение высокой твердости материалов.

В качестве альтернативной охлаждающей среды было решено использовать закалочное масло МЗМ-26 и водополимерные растворы с инверсной растворимостью на основе полиаклиленгликоля [6]. Основным преимуществом водополимерных растворов перед маслом является их пожаробезопасность и меньшая себестоимость эксплуатации. Технологический расход рабочего раствора на одну закаливаемую деталь меньше, чем расход масла [7].

Охлаждающую способность закалочных сред определяли по ISO 9950 с помощью прибора IVF Smartquench. Параметры охлаждающей способности растворов представлены в табл. 1. Объектом исследований был латунный сплав ЛМцАЖКС химического состава: 69,5 % Cu; 7,17 % Mn; 5,39 % Al; 2,06 % Fe; 2,01 % Si; 1,05 % Pb, остальное примеси.

Для определения твердости сплава был проведен нагрев образцов размерами 20×12×7 мм до температуры 750 °С, выдержкой 14 минут и последующей закалкой в различных средах: на воздухе, воде, масле и в водополимерном растворе с процентным содержанием 5, 10, 15 %. Выбор температуры обусловлен стремлением получить однофазную структуру твердого раствора и минимизировать перегрев. Также повышение температуры до 800 °С и выше способствует растворению силицидов [8] и увеличивает вероятность их выкрашивания в процессе работы.

Таблица 1

Параметры охлаждающей способности исследуемых закалочных сред

| Характеристика | Ед. изм. | 10 % раствор | 15 % раствор | 5 % раствор | МЗМ26 масло | Вода 22 °С |
|---|----------|--------------|--------------|-------------|-------------|------------|
| Максимальная скорость охлаждения | °С/с | 96,26 | 80,93 | 124,13 | 78,73 | 247,26 |
| Температура, соответствующая максимальной скорости охлаждения | °С | 596,95 | 565,56 | 650,43 | 559,22 | 650,04 |
| Температура перехода из фазы пара в фазу кипения | °С | 714,33 | 645,84 | 846,75 | 376,23 | 111,91 |
| Температура перехода из фазы кипения в фазу конвекции | °С | 272,51 | 356,93 | 103,72 | 709,21 | 233,44 |
| Скорость охлаждения при 300 °С | °С/с | 14,75 | 10,65 | 56,88 | 5,84 | 92,45 |
| Время охлаждения до 600 °С | с | 8,28 | 12,21 | 4,01 | 10,37 | 1,63 |
| Время охлаждения до 400 °С | с | 11,54 | 16,3 | 6,35 | 14,87 | 2,66 |
| Время охлаждения до 200 °С | с | 27,05 | 39,18 | 10,29 | 48,73 | 5,09 |

Далее от трубы 68,0×55 мм отрезали кольцевые заготовки высотой 12 мм. После закалки в масле, 10 % водополимерном растворе и на воздухе измеряли изменение внутреннего диаметра. Для определения остаточных тангенциальных напряжений I рода методом Давиденкова Н.Н [9] выполнили разрез отрезным кругом толщиной 1,2 мм. После снятия нагрузки номинальный размер внутреннего диаметра кольца, закаленного на воздухе, в масле и в водополимерных растворах, вернулся к исходному значению без изменения геометрической формы. У образца, закаленного в воде, выявлено осевое смещение на 1,5 мм. Результаты приведены в табл. 2.

Сравнительный анализ твердости приведен на рис. 1. Установлено, что наибольшее значение твердости имеют образцы, закаленные в 10 % растворе и в масле. Исследование микроструктуры позволило установить, что образцы, подвергшиеся закалке в воде, имеют игольчатую микроструктуру, характерную для мартенсита с четкими границами зерен, и соответствуют наблюдаемой ранее в работе [2] (рис. 2, а). Образцы, охлажденные на воздухе,

имеют типичную ($\alpha+\beta$)-структуру (рис. 2, б). При закалке в масле и 10 % водном растворе не образуется игольчатая микроструктура, как при закалке в воде. Такую микроструктуру можно классифицировать как бейнитную (рис. 2 в, з). При этом в микроструктуре обнаруживается высокая плотность линий скольжения. Микроструктуру (рис. 2, д), закаленную в 5 % растворе, можно характеризовать как промежуточную между закалкой в воде и в масле (10 % растворе) с меньшим количеством линий скольжения. После закалки в 15 % растворе формируется микроструктура без линий скольжения с выделением стабильной α -фазы по границам зерен (рис. 2, е) в количестве 10–15 %.

Таблица 2

Изменение геометрических размеров образцов

| Параметр | Воздух | Вода | 10 % полимерный раствор | Масло |
|--|--------|------|-------------------------|---------------|
| Изменение внутреннего диаметра после закалки, мм | -0,9 | -0,5 | -0,5 | -0,5 |
| Тангенциальные напряжения 1 рода, МПа | 20,6 | 15,5 | 32 | не определяли |
| Осевое смещение, мм | 1,5 | 0 | 0 | 0 |

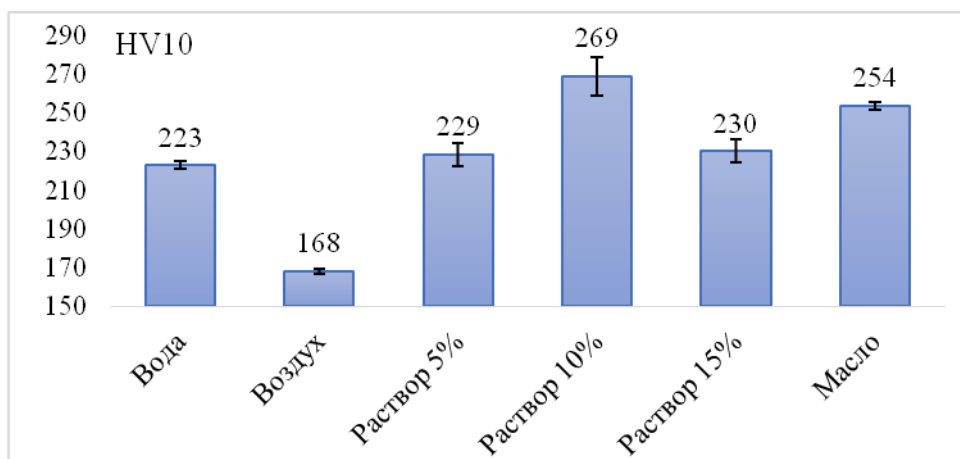
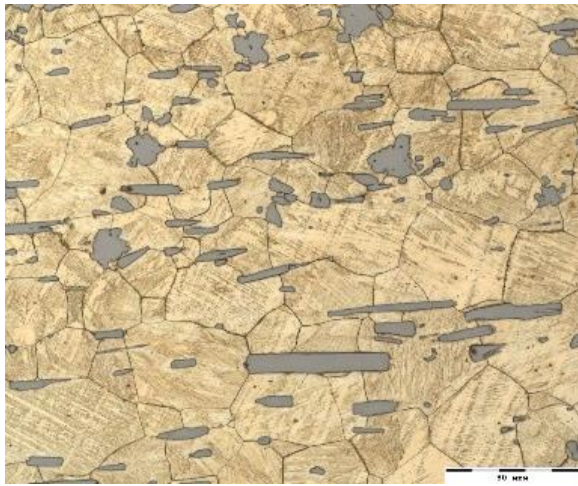


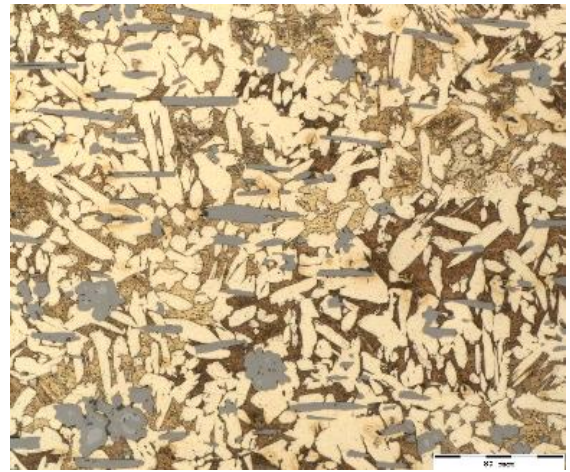
Рис. 1. Изменение твердости в зависимости от охлаждающей среды

В процессе закалки в воду скорость охлаждения сплава ЛМцАЖКС выше критической. Формирование микроструктуры происходит по бездиффузионному механизму и сопровождается полиморфным превращением. Изменение параметров кристаллической решетки приводит к значимым деформациям.

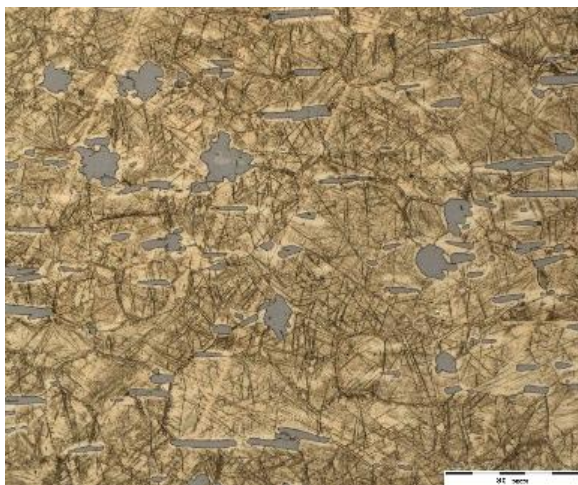
Закалка в масле и использование 10 % раствора не приводит к образованию микроструктуры мартенситного типа. Тем не менее этот процесс полностью подавляет формирование стабильной α -фазы, хотя диффузионные процессы остаются активными. В этом случае происходит истинная закалка – без полиморфного превращения. Образование линий скольжения при определенной докритической скорости охлаждения требует отдельного изучения. Учитывая, что дальнейшее снижение скорости закалки приводит к выделению стабильной α -фазы без образования линий скольжения, можно предположить, что причиной данного явления является зарождение и рост метастабильных включений α -фазы и, как следствие, формирование напряжений 2-го рода превышающих предел текучести (360–400 МПа для сплава ЛМцАЖКС в прессованном состоянии). Наоборот, увеличение скорости охлаждения подавляет диффузионные процессы, что способствует уменьшению количества линий скольжения.



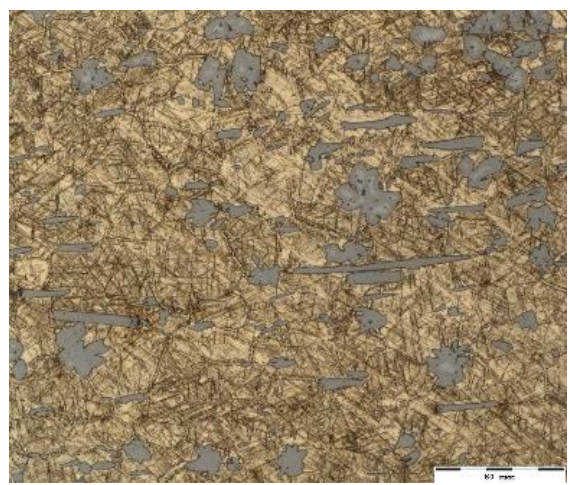
а



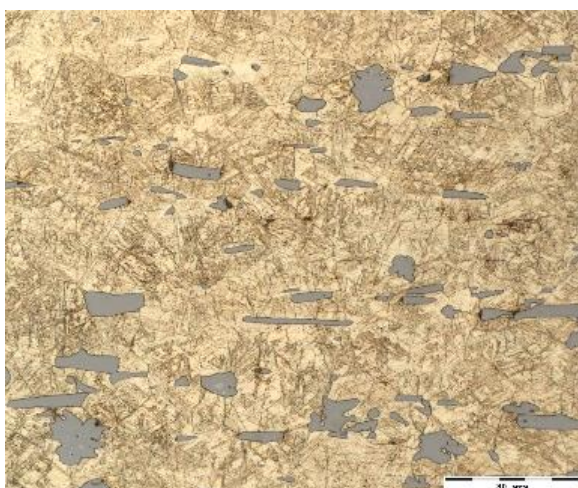
б



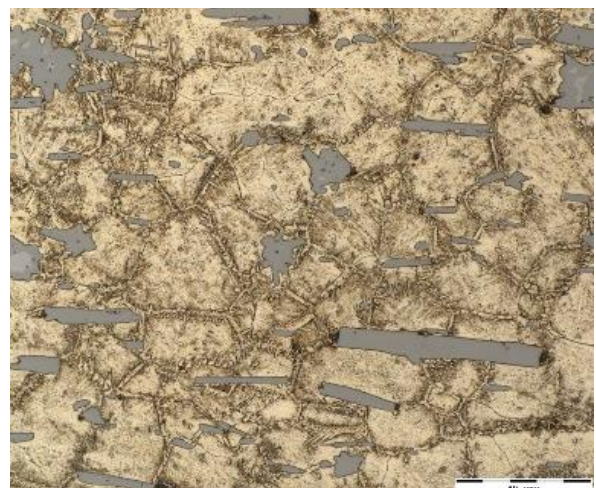
в



г



д



е

Рис. 2. Микроструктура сплава ЛМЦАЖКС в зависимости от охлаждающей среды закалки:

а – вода; *б* – воздух; *в* – масло; *г* – 10 % раствор;
д – 5 % раствор; *е* – 15 % раствор.

Увеличение $\times 500$

Заключение

В ходе проведенного исследования было установлено, что путем регулирования рабочей концентрации водополимерного раствора можно добиться твердости латуни ЛМцАЖКС, эквивалентной достигаемой при закалке в воде, при этом успешно предотвращая значительные деформации сплава. Таким образом, механизм формирования метастабильных включений α -фазы имеет ключевое значение для изучения влияния процесса закалки на механические свойства сплава. Дальнейшие исследования в этой области могут оказать существенное влияние на оптимизацию технологий обработки материалов, что, в свою очередь, приведет к улучшению их эксплуатационных характеристик. Установление зависимости между скоростью охлаждения и процессами микроструктурных превращений является важным аспектом для понимания закономерностей повышения прочности специальных латуней в процессе закалки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Котляров, И.В. Специальные латунные сплавы для колец синхронизаторов: оптимизация составов и технологических процессов / И.В. Котляров, М.Д. Копыл, А.В. Тропотов // Проблемы развития автомобилестроения в России: сборник избранных докладов II–IV международных научно-практических конференций. – Тольятти, 1996–1997–1998. – С. 130–134.
2. Структурные и фазовые превращения в $(\alpha+\beta)$ -латунях / Н.Б. Пугачева, А.А. Панкратов, Н.Ю. Фролова, И.В. Котляров // *Металлы*. – 2006. – № 3. – С. 65–75.
3. Zel'dovich, V.I. Structural mechanism of the α -phase formation and martensitic transformation in Cu-Zn-Al alloys / V.I. Zel'dovich, I.V. Khomskaya, N.Yu. Frolova // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2000. – Vol. 89, No. 3. – Pp. 292–299.
4. Котляров, И.В. Влияние химического и фазового состава специальных латуней на их твердость и износостойкость: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Котляров Игорь Викторович; [Место защиты: Тул. гос. ун-т]. – Тольятти, 2009. – 156 с.
5. Антипов, В.В. Исследование фазового состава и повышение эксплуатационных характеристик марганцевых латуней, используемых в автомобильной промышленности: дис. ... канд. техн. наук / Антипов В.В. – Москва, 2002. – 201 с.
6. Изменение свойств закалочных сред в зависимости от температуры нагрева / А.В. Святкин, В.Г. Азизбекян, Н.И. Сардаев [и др.] // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2011. – № 2 (16). – С. 74–76.
7. Осколкова, Т.Н. Закалка легированных сталей в водном растворе полимера «Термовит-М» / Т.Н. Осколкова, О.В. Шорохова // *Успехи современного естествознания*. – 2011. – № 5. – С. 141.
8. Svyatkin, A.V. On the Effect of Heating of Two-Phase Alloyed Brasses on Morphological Peculiarities of Intermetallic Inclusions / A.V. Svyatkin, A.M. Gnusina, N.N. Gryzunova // *Physics of Metals and Metallography*. – 2024. – Vol. 125, No. 6. – Pp. 594–602. – DOI: 10.1134/S0031918X24600283.
9. Исследование остаточных напряжений в изделиях, изготовленных из сложнолегированной латуни / А.В. Тропотов, Н.Б. Пугачева (Вандышева), Ю.В. Рязанцев, Л.М. Жукова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2006. – № 1. – С. 28–32.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ, ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Селеменев Р.Ю.^{1,2}✉, аспирант, инженер-технолог, Негодяев В.О.^{1,2}, аспирант, начальник бюро, Мешков А.А.^{1,3}, аспирант, начальник бюро, Никитин К.В.², д.т.н., заведующий кафедрой

¹ ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара, Российская Федерация

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

³ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: ugs@uec-kuznetsov.ru, e-mail: romanchev98@gmail.com

Предоставлены результаты испытаний образцов из сплава марки ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) на пределы прочности. Подтверждена перспективность использования технологии прямого лазерного выращивания для изготовления деталей для газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание, сварка, газотурбинный двигатель

INVESTIGATION OF WELDED JOINTS OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY SAMPLES OBTAINED BY DIRECT LASER CULTIVATION IN THE MANUFACTURE OF GAS TURBINE ENGINES

Selemenev R.Yu.^{1,2}✉, PhD student, process engineer, Negodyaev V.O.^{1,2}, PhD student, Head of the Bureau, Meshkov A.A.^{1,3}, PhD student, Head of the Bureau, Nikitin K.V.², Grand PhD in Engineering Sciences, Head of the Department

¹ PJSC UEC-Kuznetsov, Samara, Russian Federation

² Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

³ Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russian Federation

E-mail: ugs@uec-kuznetsov.ru, e-mail: romanchev98@gmail.com

The results of testing of EP 648 alloy samples (KHN50VMTUB) for strength limits are presented. The prospects of using direct laser growth technology for manufacturing parts for gas turbine engines are noted.

Keywords: direct laser cultivation, welding, gas turbine engine

Введение

В промышленности зачастую используются жаропрочные никелевые сплавы благодаря способности сохранять свои свойства при длительном воздействии высоких температур. Больше половины современных конструкций состоит из жаропрочных сплавов. Основными проблемами изготовления литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов являются неправильно подобранные пропорции шихтовых материалов, что приводит к ухудшению физических и механических свойств отливки (изделия) или образованию нежелательных фаз; неоднородная структура в различных сечениях литого изделия; повышенная газовая и усадочная пористость; склонность жаропрочных никелевых сплавов к сильному окислению при воздействии высокой температуры в процессе литья.

Технология прямого лазерного выращивания (ПЛВ), использующая мощный лазерный излучатель для послойного локального расплавления мелкодисперсного металлического порошка, является передовым методом получения различных изделий, в том числе и из жаропрочных дисперсно-твердеющих никелевых сплавов. Процесс ПЛВ представляет собой распыление порошка с помощью газовой струи, равномерно распределяющей материал над рабочей поверхностью подложки. В свою очередь мощный лазерный источник, двигаясь

по заданной программой траектории, нагревает порошок до температуры плавления, обеспечивая его сплавление с подложкой или предыдущим слоем.

Преимуществами метода ПЛВ являются: возможность получения геометрически сложных деталей разной формы и габаритов; сокращение расходов на изготовление модельной оснастки; сокращение производственного времени на изготовление пробной или мелкосерийной партии заготовок; возможность использования различных видов сплавов при создании деталей ГТД; применение камеры с контролируемой атмосферой при выращивании детали.

Цель данной работы являлось исследование прочности сварных соединений образцов, полученных методом ПЛВ для оценки перспективности дальнейшего использования данной технологии в производстве.

В исследовании рассмотрена возможность использования заготовок, полученных методом ПЛВ из жаропрочного сплава ЭП648 (ХН50ВМТЮБ), при изготовлении крупногабаритного узла, в котором некоторые части изготовлены из сплава ВЖЛ-14 методом литья по серийной технологии.

Методы исследования. Исследование проводилось на образцах, выращенных из металлопорошковых композиций (МПК), частицы которых имеют сферическую форму со сферичностью более 90 %. На поверхности частиц имеются сателлиты и поры. Микроструктура однородная, мелкодисперсная.

Заготовки были получены методом ПЛВ на отработанном [5] и заранее подтвержденном режиме выращивания (табл. 1).

Для проверки механических свойств из заготовок изготовлены образцы вдоль и поперек направления выращивания. Методом аргодуговой сварки (АрДС) неплавящимся электродом были изготовлены сварные образцы из литых заготовок марки ВЖЛ-14Н и заготовок, выращенных методом ПЛВ марки ЭП648.

Режимы сварки представлены в табл. 2.

Таблица 1

Режим выращивания

| Параметр режима ПЛВ | Значение параметра ПЛВ |
|--|---|
| Мощность лазерного излучения P , Вт | 2000 |
| Диаметр лазерного пятна \varnothing , мм | 2,5 |
| Валик, мм | 2,5 |
| Расход трансп. газа C , л/мин | 5 |
| Расход газа в сопле C , л/мин | 12 |
| Расход газа на защитное стекло C , л/мин | 7 |
| Расход порошка, г/мин | Первый валик = 22 Внутренние валики = 17,5 Последний валик = 21,5 |
| Скорость наплавки V , мм/с | 25 |
| Смещение по высоте h_1 , мм | 0,8 |
| Смещение по ширине h_2 , мм | 1,67 |
| Примечание | Пауза между соседними валиками 40 сек |

Все образцы подверглись последующей термической обработке: нагрев до 1130–1150 °С; выдержка – 1 ч, охлаждение на воздухе; старение при 880–920 °С, выдержка 16 ч, охлаждение на воздухе.

Испытания проводились на растяжение, малоцикловую усталость и длительную прочность.

Режимы сварки образцов

| Присадочная проволока | | Сила тока, А | Расход аргона в горелку, л/мин | Расход аргона на обдув, л/мин |
|-----------------------|-----------------|--------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Диаметр, мм | Марка материала | | | |
| 1,2 | ЭП533(ХН50МТЮБ) | 90–105 | 10–12 | 8–10 |

Результаты исследований. В табл. 3 представлены значения предела прочности при растяжении при комнатной и повышенной температурах.

Таблица 3

Значения предела прочности

| Материал | Температура испытаний, °С | Предел прочности, МПа | Средний предел прочности, МПа |
|--|---------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Прутки ЭП648 | 20/800 | $\geq 780/\geq 340$ | 780/340 |
| Прутки ВЖЛ-14Н | 20/600 | $\geq 830/\geq 590$ | 830/590 |
| Выращенный образец ЭП648 | 20/650 | 957–1059/799–904 | 1008/851 |
| Выращенные и сваренные образцы из ЭП648 | 20/650 | 727–781/637–667 | 754/652 |
| Выращенный образец из ЭП648, сваренный с литым из ВЖЛ14Н | 20/650 | 750–812/629–703 | 781/666 |

Заключение

Сравнение показало, что образцы, полученные методом ПЛВ, не уступают по своим механическим свойствам прокатным изделиям из аналогичных материалов. Имеют удовлетворительную свариваемость с жаропрочными материалами других марок, что допускает возможность их использования при изготовлении крупногабаритных изделий с применением сварки с литейными заготовками.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прямое лазерное выращивание изделий из порошковых материалов: принцип, оборудование и материалы / В.В. Сомонов, Г.А. Туричин, Е.В. Земляков [и др.] // Технические науки в России и за рубежом: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2016 г.). – М.: Буки-Веди, 2016. – С. 34–38. – EDN XASSPZ.
2. Прямое лазерное выращивание – перспективная аддитивная технология для авиадвигателестроения / Г.А. Туричин, Е.В. Земляков, О.Г. Климова, К.Д. Бабкин, Ф.А. Шамрай, Д.Ю. Колодяжный // Сварка и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 54–57. – EDN TZKNYD.
3. Патент RU 2 687 545 С1. Малоэмиссионная камера сгорания и способ подачи в ней топлива / Р.С. Кашапов, Д.А. Максимов, Д.В. Скиба, Т.С. Харисов; Патентообладатель: Кашапов Рафаэль Салихьянович; Заявл.: 2018130044, 2018.08.17; Опубликовано: 2019.05.14.
4. Негодяев, В.О. Конструкция коаксиальных сопловых головок / В.О. Негодяев, Д.Л. Роганов, А.В. Балякин // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 69. – Ч. 2. – С. 64–70. – EDN JABDRU.
5. Мешков, А.А. Практика изготовления деталей методом лазерной порошковой металлургии на ответственных роботизированных установках // А.А. Мешков / Молодёжь и будущее авиации и космонавтики: сборник аннотаций конкурсных работ XIII Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов в области авиационной и ракетно-космической техники и технологий. – Москва, 2021. – С. 209. – EDN VYTJVI.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Шевченко С.¹ ✉, к.т.н., доцент, **Рожнятовский А.В.**¹, к.т.н., доцент, **Брюховецкий А.Н.**², д.т.н., доцент, **Коршенко К.В.**², к.т.н., доцент, **Денисов Д.А.**, магистрант

¹ Филиал Самарского государственного технического университета,

г. Сызрань, Российская Федерация;

² Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова,

г. Луганск, Российская Федерация

E-mail: sfsamgtu@sfsamgtu.ru

Представлены результаты влияния компонентного состава различных антифрикционных материалов на эффективность работы фрикционных сопряжений при различных режимах нагружения. Отмечена перспективность использования антифрикционных углерод-углеродных композиционных материалов для применения в тяжело нагруженных узлах трения при работе в условиях высоких температур.

Ключевые слова: антифрикционный материал, коэффициент трения, углерод-углеродные композиционные материалы

RESEARCH OF ANTIFRICTION CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS

Shevchenko S.¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Rozhnyatovsky A.V.**¹, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Bryukhovetsky A.N.**², Grand PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Korshenko K.V.**², PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, **Denisov D.A.**, Master's Degree student

¹ Syzran branch of Samara State Technical University, Syzran, Russian Federation

² Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov, Lugansk, Russian Federation

E-mail: sfsamgtu@sfsamgtu.ru

The results of the influence of the component composition of various antifriction materials on the efficiency of friction couplings under various loading conditions are presented. The prospects of using antifriction carbon-carbon composite materials for use in heavily loaded friction units when operating at high temperatures are noted.

Keywords: antifriction material, coefficient of friction, carbon-carbon composite materials

Одной из основных проблем транспортного машиностроения является повышение износостойкости и снижение энергоемкости в узлах и механизмах, имеющих фрикционные сопряжения. Решению этой проблемы посвящены работы известных учёных: А.Ю. Ишлинского, Б.В. Дерягина, И.В. Крагельского, С.Б. Ратнера, А.П. Семенова, Б.И. Костецкого, А.В. Чичинадзе и других.

В последние годы широкое применение получили различные виды новых композиционных материалов [1–2], в том числе и углерод-углеродные композиционные материалы [3]. В современных машинах и установках узлы трения отличаются многообразием конструктивного исполнения, условиями работы, возможностью применения смазок, параметрами нагружения и другими специфическими требованиями.

Рассмотрим влияние коэффициента трения на снижение энергоемкости и повышение износостойкости на примере опорно-возвращающих устройств (ОВУ) (рис. 1), которые обеспечивают сочленение кузова и тележек магистральных тепловозов, так как в этом фрикционном сопряжении присутствуют значительные моменты, влияющие не только на эффективность работы, но и на безопасность движения.

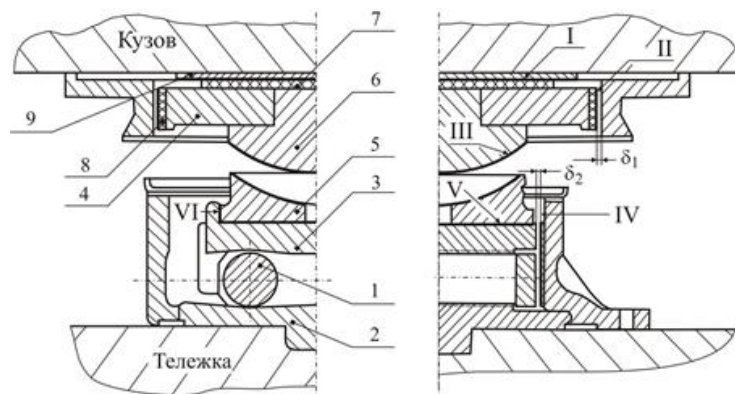


Рис. 1. Схема ОВУ тепловоза, бесчелюстная тележка:
I, II, III, IV, V, VI – поверхности трения скольжения

Основной целью совершенствования триботехнических характеристик узлов трения ОВУ является снижение коэффициента трения на несущих вертикальную нагрузку поверхностях трения. Для этого необходимо подобрать эффективно работающую пару трения (сталь – антифрикционный материал), которая обеспечивала бы достаточно низкий и стабильный коэффициент трения в условиях силового и скоростного нагружения, характерного для опорно-возвращающих устройств.

Кузов тепловоза опирается на каждую тележку через четыре комбинированные опоры, которые допускают упругое поперечное смещение кузова относительно тележек и угловой поворот тележек относительно кузова. Передние и задние опоры размещены относительно оси шкворня на разных радиусах, что обусловлено необходимостью обеспечения равенства нагрузок. Относ кузова происходит на роликах 1, которые перекатываются между образующими поверхностями нижней 2 и верхней 3 плит (см. рис. 1). Образующие роликов параллельны продольной оси тележки и перекатываются в поперечной плоскости к направлению движения. Угловое перемещение тележки относительно кузова осуществляется перемещением скользящего 4, который опирается на ролики через верхнюю плиту 3, гнездо 5 и промежуточную шаровую опору 6. Рабочие поверхности скользящего – верхняя 7, воспринимающая часть веса кузова, и боковые направляющие 8 – снабжены накладками из полимерной смолы П68.

Плита 9 на кузове изготовлена из стали 65Г и имеет полированную поверхность твердостью 35–45 HRC. Процесс фрикционного взаимодействия при повороте тележки определяется величиной угла поворота и характеризуется относительным перемещением верхней и нижней плит на роликах и трением скольжения на поверхностях трения I, II, III, IV, V, VI. При этом наибольшую работу трения выполняет главная пара трения: сталь 65Г – полимерная смола П68.

Для определения момента трения и возвращающего момента в опорах тележки в зависимости от угла её поворота относительно кузова тепловоза мы воспользовались выражениями (1) и (2), представленными в работе [4]. При расчётах статическая нагрузка на опоры принималась равной соответственно 110 и 104 кН.

$$M_{тр} = 5.728P\mu_1 + 4.025P\mu_2\alpha^2 + 4.270P\mu_1\mu_3 + 2.940P\mu_2\mu_3 + 2.675P\mu_2\mu_3\alpha^2, \quad (1)$$

где P – вертикальная нагрузка на опору;

μ_1 – коэффициент трения главной пары (сталь по пластмассе);

μ_2 – коэффициент трения второй пары (сталь по накладке или по стали);

μ_3 – коэффициент трения третьей пары (сталь по стали);

α – угол поворота тележки относительно кузова.

$$M_{воз} = \frac{P \cdot 1.248\alpha^2}{(R-r)} \cdot 1.632 \sin(49^\circ 10') + \frac{P \cdot 0.711\alpha^2}{(R-r)} \cdot 1.232 \sin(30^\circ). \quad (2)$$

Результаты расчётов по определению момента трения и возвращающего момента в опорах тележки в зависимости от угла её поворота относительно кузова по выражениям (1) и (2) для тепловозов 2ТЭ116 и ТЭП150 приведены на рис. 2. При расчётах принята статическая нагрузка на опоры соответственно 110 и 104 кН.

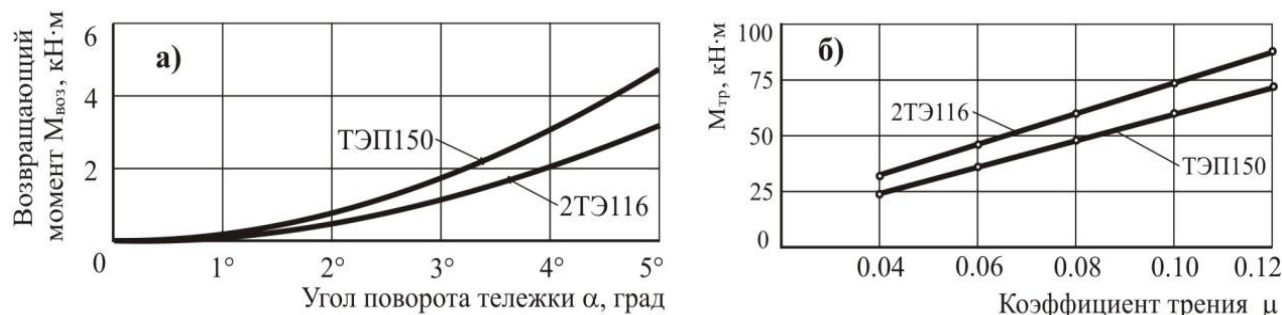


Рис. 2. Зависимость возвращающего момента от угла поворота тележки (а) и момента сил трения от коэффициента трения в главной паре трения (б)

Как следует из полученных результатов, моменты от сил трения в опорах намного превышают по величине возвращающий момент от поперечных горизонтальных сил, возникающих в роликовом аппарате при угловом повороте тележки относительно кузова тепловоза. Приведенные расчёты также показывают, что влияние угла поворота тележек относительно кузова на величину момента сил трения в опорах весьма незначительное, в то же время очевидно существенное влияние коэффициента трения между контактными поверхностями главной пары трения – скользун по полимерной накладке.

Следует отметить, что еще в 1988 г. во ВНИКТИ были проведены испытания подвижных соединений экипажа тепловозов с целью исследования изнашивания пар трения «металл – пластмасса» и влияния компонентного состава на эффективность работы фрикционных сопряжений при режимах нагружения. Для испытаний на натурной стендовой установке были отобраны различные по составу полимерные композиции, выбор материалов осуществлялся на основании известных опытных данных: капролон, капрон, полиформальдегид, полиамид П-68 с добавлением 10 % графита, полиамид П-68 с добавлением 10 % дисульфида молибдена, полиамид П-68, эпоксидная композиция ЭТС-52, фенопласт с линтером и добавлением 7 % дисульфида молибдена, фенопласт с древкрошкой и добавлением 7 % дисульфида молибдена, ацетальная смола.

Фрикционные характеристики исследовались у 10 различных пар трения, составленных из приведенных типов пластмасс и контртелами из стали. Испытания осуществлялись на стенде по схеме «плоскость – плоскость» с возвратно-поступательным движением рабочего органа и частотой изменения направления движения до 1,8 Гц, при этом условия нагружения были общими и одинаковыми для всех пар трения и соответствовали эксплуатационным: удельное давление до 35 МПа и скорость движения до 4,5 м/с. Испытания на работоспособность проводились при разовой смазке и их продолжительность соответствовала эквивалентному пробегу в 300 тыс. км. Результаты данных испытаний по определению величины коэффициента трения приведены на рис. 3.

Из анализа результатов испытаний видно, что поверхностно-активные наполнители дисульфид молибдена и графит, имеющие решетчатую слоистую структуру, играют роль твердой смазки. Влияние механической обработки (чистота поверхности, направление штрихов) на изнашивание пластмасс по мере приработки быстро падает.

Лучшие характеристики по износу получены в случае использования в качестве матричного материала полимеров полиамидной группы, а также ацетальной смолы с наполнителями в виде самосмазывающихся материалов при сухом трении – масло, графит, дисульфид молибдена.

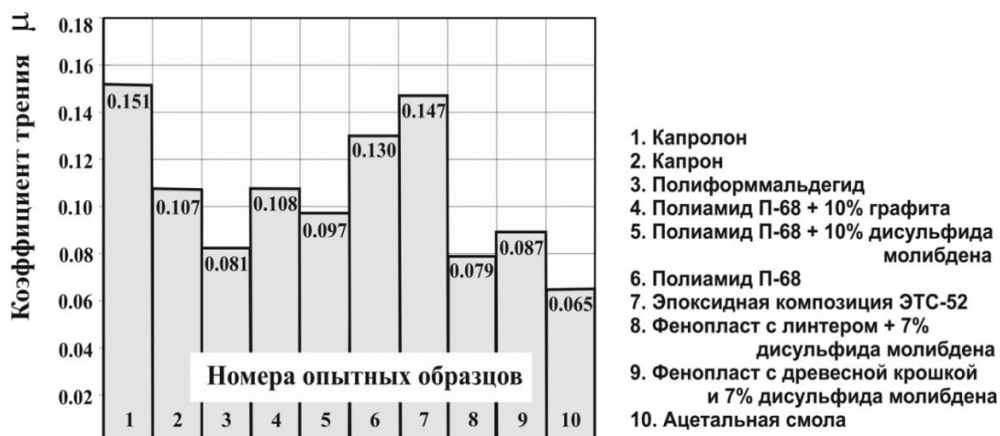


Рис. 3. Результаты испытаний полимерных композиций по определению коэффициента трения

Приведенные исследования подтверждают, что материал антифрикционной накладки должен состоять из износостойкой основы и наполнителя, снижающего коэффициент трения при сухом трении – масло, графит, дисульфид молибдена.

Для сравнительного анализа нами были разработаны антифрикционные углерод-углеродные композиционные материалы (У-УКМ) с пироуглеродной матрицей, которые были изготовлены путём связывания пироуглеродом преформ из порошков природных графитовых материалов: графит С-2 по ТУ 113-08-48-63-90 мелкозернистый с размером частиц 2–15 мкм; графит специальный малозольный по ГОСТ 18191-78 крупнозернистый с частицами 70–400 мкм. Для сравнительных испытаний были также изготовлены аналогичные материалы на основе мелкодисперсных порошков углеродной ткани УРАЛ-Т22 и на основе этой же ткани, модифицированной пироуглеродом с размером частиц менее 50 мкм и содержанием пироуглерода ~67–70 %, уплотнение пироуглеродом осуществлялось с использованием газофазного термоградиентного метода. Испытания проводились с целью установления величины коэффициента трения, его стабильности и определения износостойкости новых антифрикционных материалов.

Исследования проводились в условиях сухого трения по закалённому стальному диску (НВ = 580–620) и идентичных условиях нагружения, при этом величина коэффициента трения определялась как минимальное и максимальное значения по результатам измерений. Для образцов каждого вида материалов результаты испытаний показаны в таблице.

Результаты сравнительных испытаний антифрикционных материалов

| Тип | Вид материала | Кoeffициент трения μ по стали без смазки |
|-----|---|--|
| 1 | У-УКМ, наполнитель в виде графита С-2 | 0,07–0,1 |
| 2 | У-УКМ, графит специальный ГСМ-2, малозольный | 0,05–0,1 |
| 3 | У-УКМ, размолотый порошок углеродной ткани типа УРАЛ-Т22 | 0,06–0,1 |
| 4 | У-УКМ, размолотый порошок углеродной ткани УРАЛ-Т22, модифицированной пироуглеродом | 0,06–0,09 |

Следует отметить значительный разброс по величинам измерений коэффициента трения даже в условиях повторных замеров одних и тех же образцов в установленных и равных режимах нагружения.

Лучшие показатели по реализуемой величине коэффициента трения по сравнению с предыдущими данными показали материалы У-УКМ с наполнителями в виде специального графита малозольного ГСМ-2 и мелкодисперсного порошка из углеродной ткани УРАЛ-Т22, в том числе и модифицированные пироуглеродом.

Для У-УКМ с пироуглеродной матрицей и различными наполнителями в виде графитовых материалов, которые ранее не использовались в качестве антифрикционных материалов, проведены дополнительные опыты с различным удельным давлением (2 МПа, 3,4 МПа и 4,7 МПа) и постоянной скоростью скольжения (300 об/мин, что соответствует линейной скорости 0,79 м/с). При этом испытания проводились для пяти образцов каждого материала вида У-УКМ и результаты усреднялись, что показано на рис. 4.

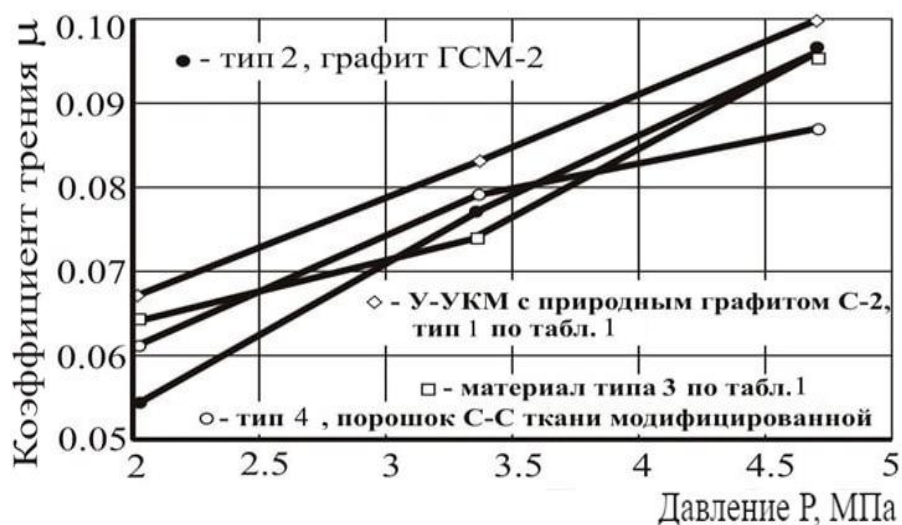


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от удельной нагрузки

Антифрикционные углерод-углеродные композиционные материалы с пироуглеродной матрицей и наполнителем в виде мелкодисперсных частиц порошка из углеродной ткани были получены путём мелкого размола углеродных волокон, при этом в процессе помола была разрушена упорядоченная ориентация частиц углерода, вследствие чего полученный порошок приобрёл новые графитоподобные свойства. Принимая во внимание, что процесс графитизации углеродной ткани проводился при температуре более 2200 °С, полученный мелкодисперсный наполнитель имел все свойства графита и играл роль твёрдой смазки между трущимися поверхностями. Все антифрикционные У-УКМ имеют достаточно низкий коэффициент трения при работе по закалённой стали и без смазки. Полученные результаты позволяют рекомендовать антифрикционные У-УКМ для применения в тяжело нагруженных узлах трения, особенно при работе в условиях высоких температур, поскольку эти материалы обладают способностью сохранять свои механические, теплофизические и триботехнические свойства в температурном диапазоне до 1000 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: справочник / Под общ. ред. И.В. Горынина, А.С. Орыщенко. – СПб.: Проффессионал, 2012. – 916 с.
2. Антифрикционные материалы на основе полимерных волокон / Г.С. Кулагина, А.Ч. Кан, Г.Ф. Железина, Н.М. Левакова // Труды ВИАМ. – 2022. – № 11 (117). – С. 48–59.
3. Старченко, В.Н. Новые антифрикционные материалы для опорных устройств подвижного состава / В.Н. Старченко // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 66 Международной научно-практической конференции. – Днепропетровск: Изд-во ДНУЖТ, 2006. – С. 103–104.
4. Научное обоснование, изготовление и испытания опытных узлов и деталей, изготовленных из композиционных материалов на основе углерода, для опорных и тормозных устройств тепловоза ТЭП150 и подвижного состава // Отчёт о НИР (заключительный). Рук. работы В.Н. Старченко. № гос. регистр. 0105U006925. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2006. – 102 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРЕМНИЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ФАЗЫ TiC ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕТОДОМ СВС КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННОГО СПЛАВА АК10М2Н

Шерина Ю.В., к.т.н., Луц А.Р., к.т.н., доцент

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: yulya.makhonina.97@inbox.ru

Показано влияние кремния в составе матричного сплава АК10М2Н на стабильность образующей в результате СВС реакции фазы карбида титана. Изучены структурно-фазовый состав и значения твердости композиционного материала АК10М2Н-TiC при изменении времени выдержки после синтеза армирующей фазы. Выявлено, что по истечении 5 минут выдержки в составе образуется только целевая фаза TiC, однако увеличение времени выдержки приводит к деградации фазы TiC и после 15 минут выдержки образуется дополнительно фаза SiC, а после 30 минут – МАХ-фаза состава Ti₃SiC₂, что сопровождается снижением твердости композиционного материала. Таким образом, показано, что наличие кремния в составе матричного сплава диктует необходимость строго соблюдать технологию и не допускать превышения времени выдержки.

Ключевые слова: композиционный материал, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, карбид титана, АК10М2Н

RESEARCH IMPLICATIONS OF CREMNIUM ON THE STABILITY OF TiC PHASE INSTITUTION PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIAL ON THE BASIS OF INDUSTRIAL ALLOY BY THE SVC METHOD АК10М2Н

Sherina Yu.V., PhD in Engineering Sciences,
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 silicon in the composition of matrix alloy АК10М2Н on the stability of titanium carbide phase formed as a result of SHS reaction. The structural-phase composition and hardness values of АК10М2Н-TiC composite material were studied at changing the holding time after synthesis of the reinforcing phase. It is revealed that after 5 minutes of holding time only the target phase TiC is formed in the composition, but the increase of holding time leads to the degradation of the phase TiC and after 15 minutes of holding time the additional phase SiC is formed, and after 30 minutes – МАН-phase of composition Ti₃SiC₂, which is accompanied by a decrease in hardness of the composite material. Thus, it is shown that the presence of silicon in the composition of the matrix alloy dictates the need to strictly follow the technology and do not allow exceeding the holding time.

Keywords: composite material, self-propagating high-temperature synthesis, titanium carbide, АК10М2Н

Силумины (Al-Si) широко используются в промышленности благодаря их небольшому весу, устойчивости к коррозии и высоким показателям литейных свойств, таким как жидкотекучесть и малая линейная усадка. Они широко применяются для производства средних и крупных литых деталей, таких как, например, головки цилиндров, поршни двигателей внутреннего сгорания и др. Наибольшее распространение получили специальные силумины, в составе которых, помимо кремния, присутствуют и другие легирующие элементы: медь, магний, марганец, титан, а также никель, цирконий и хром. Но даже после легирования силумины уступают по прочности и износостойкости другим сплавам, например, дуралюминам. Поэтому задача улучшения механических характеристик силуминов остаётся актуальной [1].

Одним из наиболее перспективных способов улучшения показателей прочности и износостойкости силуминов является армирование их дисперсными керамическими фазами, в качестве которых эффективно используются частицы карбида титана [2, 3]. Среди существующих методов производства алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ) наиболее часто применяют жидкофазные методы, среди которых особое место занимает самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) в расплаве, разработанный в СамГТУ [4, 5].

В работах иностранных ученых показано, что присутствие кремния может оказывать влияние на стабильность фазы карбид титана. Так, в работе [6] показано, что при армировании сплава Al-7 % Si 10 масс.% TiC при температуре расплава 800 °С увеличение времени выдержки до 6 часов приводит к распаду TiC с образованием тройной фазы Ti-Al-Si и интерметаллической Al₄C₃, хотя при этом отмечается возможность восстановления фазы TiC при увеличении температуры расплава до значений свыше 800 °С. Однако противоположные результаты изложены в публикации [7], где отмечается, что при синтезе фазы TiC в составе сплава Al-12 % Si при 800 °С увеличение времени выдержки с 5 до 20 минут приводит к практически полному распаду карбида титана без возможности последующего восстановления. Данное явление авторы связывают со способностью кремния диффундировать в решетку карбида титана, разрушая его структуру, что также подтверждается и в работе [8], где показано, что при введении в лигатуру Al-3 % Ti-0,75 % C (полученную методом СВС при 1000 °С) 7 или 13 масс. % Si при температуре 800 °С с выдержкой расплава 10 минут формируются фазы Al₄C₃ и TiAl_xSi_y, а увеличение температуры до 900 °С способствует образованию фаз Al₄C₃ и Ti₃SiC₂.

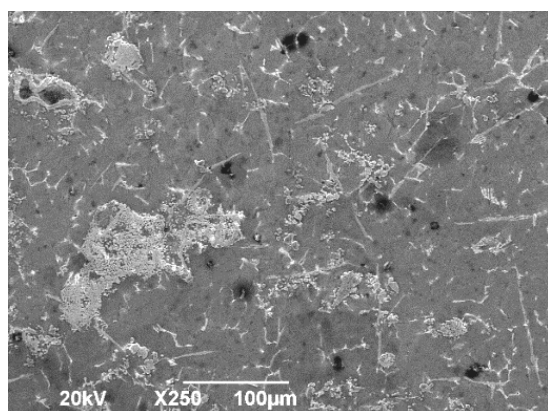
В СамГТУ ранее были проведены исследования по разработке технологии армирования методом СВС востребованного промышленностью поршневого сплава АК10М2Н, что позволило получить композиционный материал АК10М2Н-10 % TiC, содержащий основные фазы Si и TiC и отличающийся повышенными значениями характеристик твердости и износостойкости [9]. В рамках предложенной технологии после проведения синтеза предусмотрена технологическая выдержка расплава при температуре 900 °С в течение 5 минут, предназначенная для завершения химического взаимодействия компонентов. Однако по результатам проведенного обзора с учетом того, что оценка термодинамической стабильности карбидной фазы в присутствии кремния разными авторами существенно отличается, целью настоящей работы было поставлено изучение влияния длительности времени выдержки на конечный фазовый состав композиционного материала, синтезированного методом СВС.

На рис. 1 представлены микроstructures композиционного материала на основе матричного сплава АК10М2Н, армированного 10 масс. % TiC, с различным временем выдержки расплава при температуре 900 °С после завершения СВС-реакции взаимодействия компонентов шихты – титана и углерода. Анализ микроstructures после выдержки расплава в течение 5 минут позволяет сделать вывод о наличии, предположительно, фазы карбида титана глобулярной формы с размерами частиц от 180 нм до 2 мкм, расположенными преимущественно на границах с кристаллами кремния (рис. 1, а, б).

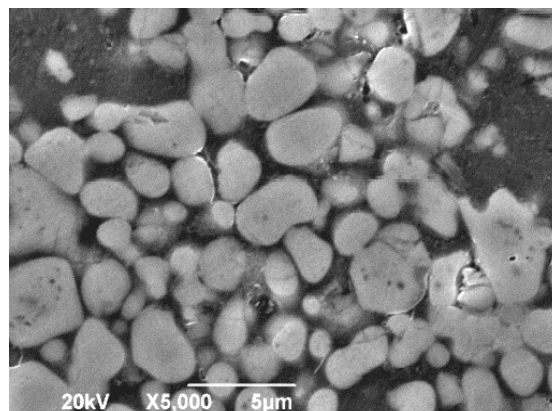
Дальнейшее увеличение времени выдержки расплава до 15 и 30 минут показало качественное изменение микроstructures, и вместо глобулярных частиц, свойственных по форме карбиду титана, преобладающими становятся частицы игольчатой и остроугольной формы (рис. 1, в–е), что дает возможность предположить изменение фазового состава композиционного материала и образование фаз типа Al₃Ti, SiC, Ti₃SiC₂ [3, 10].

С целью установления точного фазового состава был проведен рентгенофазовый анализ синтезированных образцов, результаты которого представлены на рис. 2–4. Согласно полученным результатам, соблюдение стандартного времени выдержки обеспечивает образование только фазы кремния в количестве 10 масс. % и карбида титана в количестве 9 масс. % (см. рис. 2), что дает возможность сделать вывод о сохранении химического состава матричного сплава и подтверждает смачиваемость карбидных частиц расплавом [3]. Полученные дан-

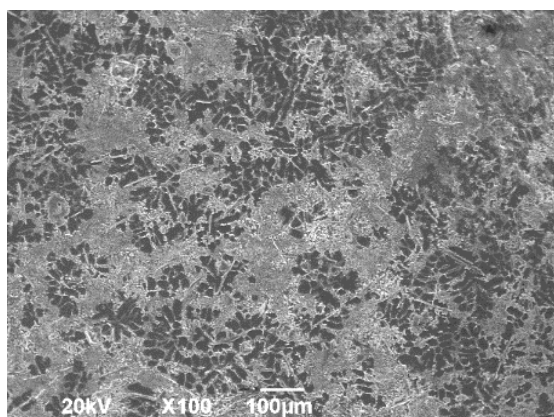
ные также подтверждают, что вследствие быстротечности процесса СВС и малого времени выдержки деградация образуемой фазы карбида титана не происходит [11]. Однако с увеличением времени выдержки отмечается качественное изменение фазового состава и после выдержки 15 минут появляется фаза SiC с массовым соотношением фаз в образце: Si – 7 масс. %, TiC – 8 масс. % и SiC – 2 масс. % (см. рис. 3), а после 30 минут – Ti_3SiC_2 с соотношением: Si – 8 масс. %, TiC – 5 масс. % и Ti_3SiC_2 – 2 масс. % (см. рис. 4).



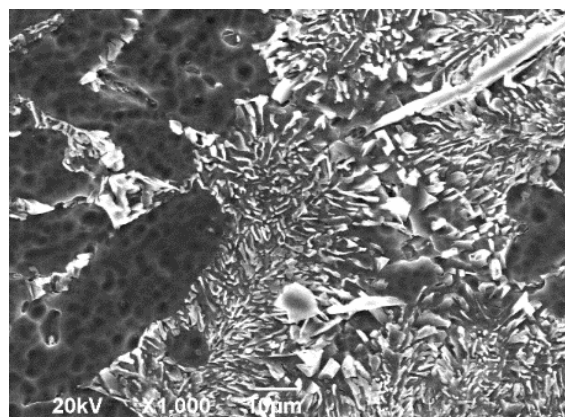
a



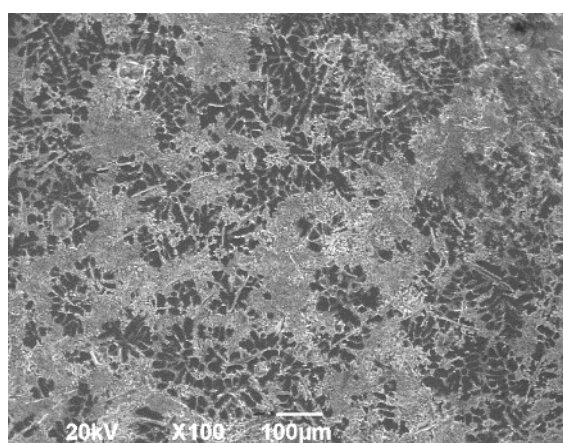
б



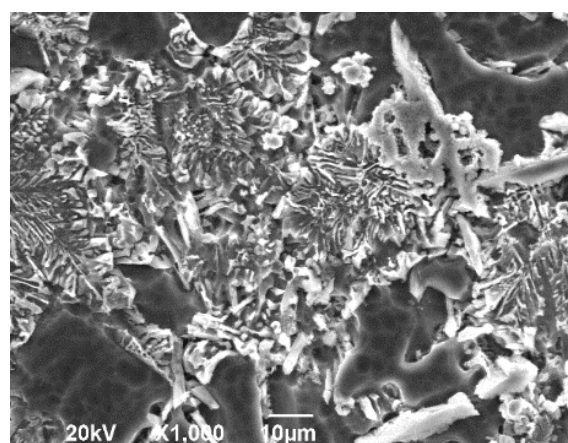
в



г



д



е

Рис. 1. Микроструктуры композиционного материала АК10М2Н-10 % TiC:

a, б – выдержка 5 минут;
в, г – выдержка 15 минут;
д, е – выдержка 30 минут

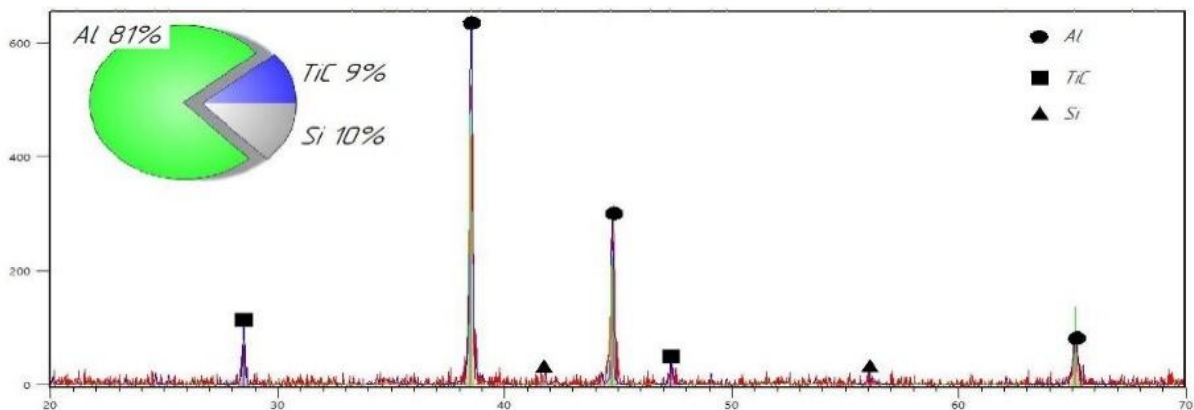


Рис. 2. РФА композиционного материала АК10М2Н-10 % TiC, выдержка 5 минут

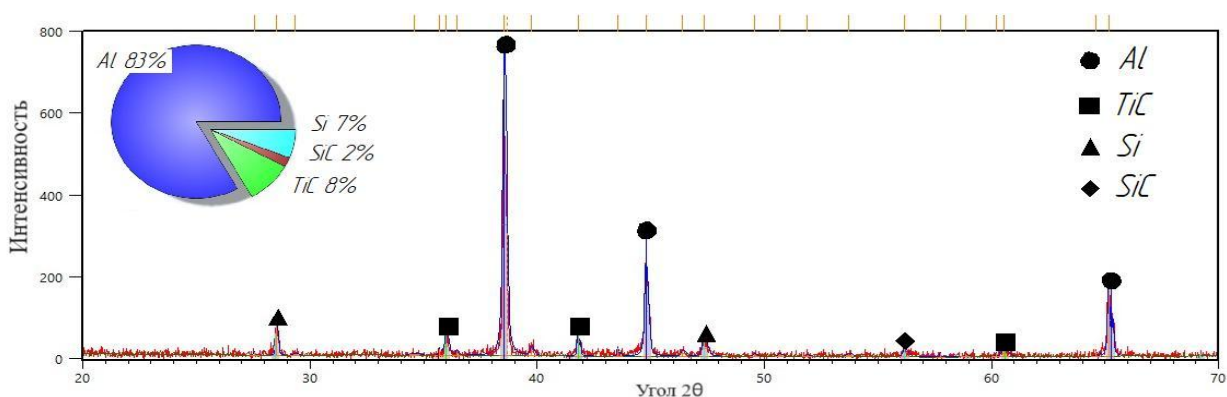


Рис. 3. РФА композиционного материала АК10М2Н-10 % TiC, выдержка 15 минут

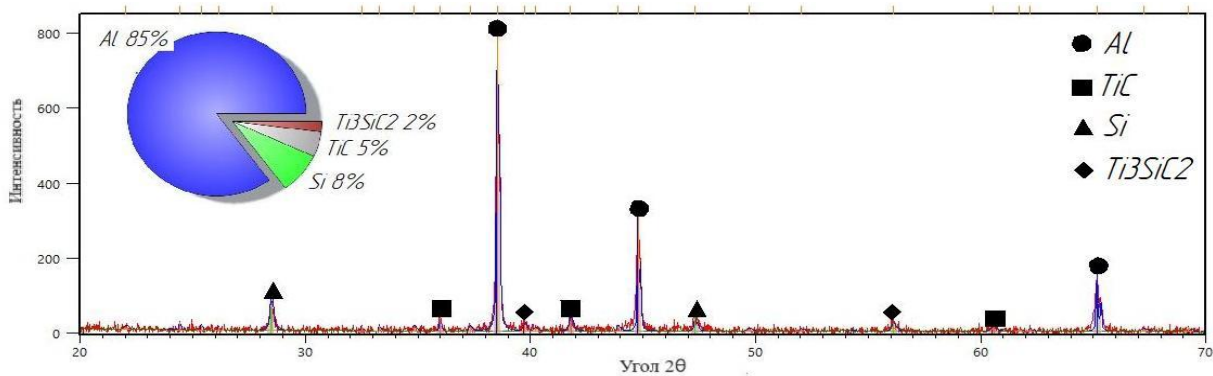


Рис. 4. РФА композиционного материала АК10М2Н-10 % TiC, выдержка 30 минут

Таким образом, полученные результаты подтверждают данные работ [6–8], согласно которым увеличение времени выдержки после синтеза карбидной фазы в расплаве силумина способствует распаду TiC и образованию таких фаз, как SiC или Ti_3SiC_2 .

С целью оценки влияния изменения фазового состава на свойства композиционного материала были проведены замеры твердости полученных образцов (рис. 5). Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что любое армирование приводит к повышению твердости матричного сплава, однако наибольший показатель твердости 122 НВ наблюдается в композиционных материалах АК10М2Н-10 % TiC и АК10М2Н-8 % TiC-2 % SiC, что обусловлено высокой твердостью обеих карбидных фаз [3] и согласуется с данными работы [12]. А в образце АК10М2Н-5 % TiC-2 % Ti_3SiC_2 значение твердости снижается до 115 НВ, что объясняется аномальной «мягкостью» фазы Ti_3SiC_2 по сравнению с большинством карбидов.

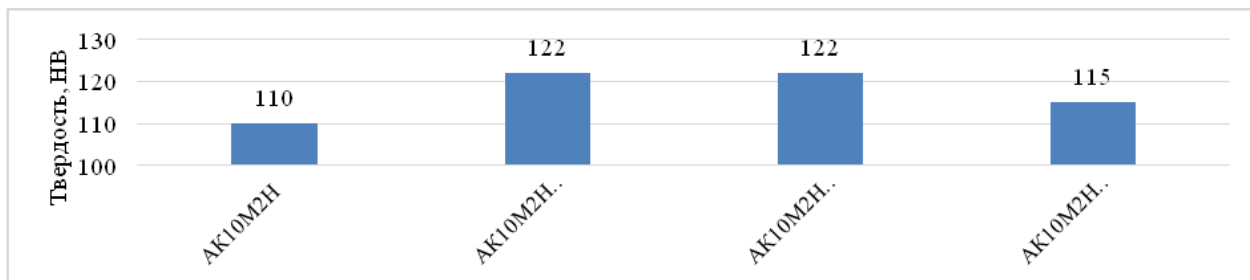


Рис. 5. Изменение твердости композиционных материалов

Таким образом, по результатам проведенного исследования выявлено, что увеличение времени выдержки при $T = 900$ °С после завершения синтеза фазы TiC в расплаве, содержащем Si, сопровождается деградацией фазы карбида титана с образованием кремнийсодержащих фаз SiC и Ti_3SiC_2 , что приводит к снижению значений твердости АМКМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белов, Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов / Н.А. Белов. – М.: МИСИС, 2009. – 234 с.
2. Рафальский, И.В. Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения / И.В. Рафальский. – Минск: БНТ, 2016. – 209 с.
3. Михеев, Р.С. Дискретно-армированные композиционные материалы системы Al-TiC: обзор / Р.С. Михеев, Т.А. Чернышова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 11. – С. 44–53.
4. Получение легированного композиционного материала Al-Cu-Mn-TiC с повышенными триботехническими свойствами / А.Р. Луц, А.П. Амосов, Е.И. Латухин, А.Д. Рыбаков, С.В. Шигин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2020. – Т. 18. – № 6. – С. 278–282.
5. Применение процессов СВС для получения in situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными частицами карбида титана: обзор / А.П. Амосов, А.Р. Луц, Е.И. Латухин, А.А. Ермошкин // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2016. – № 1. – С. 39–49.
6. López, V.H. The thermal stability of TiC particles in an Al7wt.%Si alloy / V.H. López, A. Scoles, A.R. Kennedy // Materials Science and Engineering: A. – 2002. – Vol. 356, Issues 1–2. – Pp. 316–325.
7. Instability of in situ TiC particles in an Al-12Si alloy / F. Xia, M.X. Liang, X.S. Gao, Y.C. Guo, J.P. Li, W. Yang, Z.K. Zhang // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – No. 9 (5). – Pp. 11361–11369.
8. Ding, H. Influence of Si on stability of TiC in Al melts / H. Ding, X. Liu // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2011. – No. 21 (7). – Pp. 1465–1472.
9. Шерина, Ю.В. Разработка композиционного материала на основе сплава АК10М2Н и исследование его триботехнических свойств / Ю.В. Шерина, А.Р. Луц, И.Д. Ибатуллин // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 2 (128). – С. 11–16.
10. Амосов, А.П. Применение процессов инфильтрации и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения керметов: обзор / А.П. Амосов, Е.И. Латухин, Э.Р. Умеров // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2021. – Т. 27, № 6. – С. 52–75.
11. Шерина, Ю.В. Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана, синтезированной в расплаве, и термообработки на структуру и свойства промышленных алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук / Шерина Ю.В. – Самара, 2024. – 207 с.
12. Vishnuvardhan Reddy, D. The investigation of mechanical and metallurgical properties on Al7075-TiC-SiC reinforced hybrid composites by stir casting / D. Vishnuvardhan Reddy, P. Salonica Sravani, N. Deepthi // International Journal of Mechanical and Production. – 2019. – № 9. – Pp. 769–776.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Секция 1. Проектирование, эксплуатация и метрологическое обеспечение инструментальных систем и оборудования современных машиностроительных производств | 3 |
| <i>Болдырев А.А., Болдырев А.И., Григораш В.В.</i> Экспериментальное исследование анодного поведения связки М 1 при профилировании алмазных шлифовальных кругов..... | 3 |
| <i>Борисов М.А., Надеждина О.А., Зворыгин А.С.</i> Зависимость шероховатости поверхности от плотности тока, температуры и концентрации электролита при электрохимическом шлифовании стали 12Х18Н10Т..... | 6 |
| <i>Брунгардт А.В. Брунгардт М.В., Шатохин С.Н.</i> Виброустойчивость инверторного шпиндельного модуля с опорами качения..... | 10 |
| <i>Буханов С.А., Лагута В.С., Овсянников М.В.</i> Проектирование конфигурации производственной системы на этапах жизненного цикла | 14 |
| <i>Галеев Д.И., Портянко С.А.</i> Разработка технологии окончательной обработки лопаток газотурбинных двигателей | 19 |
| <i>Галеев Д.И., Носов Н.В.</i> Шероховатость лопаток газотурбинных двигателей при виброконтактном полировании..... | 23 |
| <i>Гордиенко Я.М.</i> Исследование высоты волнистости при прерывистом шлифовании титанового сплава ВТ-12 путем изменения числа режущих сегментов и режимов резания | 26 |
| <i>Гришин Р.Г., Гордиенко Я.М.</i> Современное состояние технологических решений в области прерывистого шлифования..... | 30 |
| <i>Зверев И.А., Слесарев В.В.</i> Исследование температурного поля шпиндельного узла | 34 |
| <i>Копьяк Д.Г.</i> Выбор рационального метода крепления сменных твердосплавных пластин к корпусу протяжки..... | 38 |
| <i>Ладягин Р.В.</i> Моделирование эксплуатационных характеристик и конструктивных параметров шпиндельного узла путем построения нейросетей прямого и обратного действия..... | 44 |
| <i>Малкина И.В.</i> Использование оптических методов контроля качества при изготовлении изделий машиностроения..... | 49 |
| <i>Носенко В.А., Зуев А.В., Светличная В.Б.</i> Влияние микрогеометрических параметров сферической поверхности роликов на акустические характеристики подшипника..... | 53 |
| <i>Осипов А.А., Осипов А.П., Носов Н.В.</i> К вопросу об определении режущей способности и степени засаленности абразивного инструмента | 57 |
| <i>Осипов А.А., Осипов А.П., Носов Н.В.</i> К вопросу о влиянии режимов резания на снижение шероховатости шлифованной поверхности при плоском шлифовании | 61 |
| <i>Рогожников И.А.</i> Повышение эффективности шлифования деталей газотурбинных двигателей с помощью адаптивных систем управления | 64 |
| <i>Саламатов Е.С., Захаров О.В.</i> Сравнительная оценка радиусного и координатного методов измерения центра окружности | 67 |
| <i>Трофименко Н.Г.</i> Анализ прочности восстановленных сменных многогранных пластин..... | 70 |
| Секция 2. Инновационные направления в науке и образовании | 74 |
| <i>Антошин И.А., Ярьсько С.И., Девойно О.Г.</i> Структура конечно-элементной модели расчета остаточных напряжений при лазерной термообработке двухслойных структур..... | 74 |
| <i>Болдырева А.С., Носов Н.В.</i> Исследование шероховатости поверхности при детонационном покрытии..... | 78 |
| <i>Гаспарова Л.Б.</i> «Цифровой двойник» учебной лаборатории | 82 |
| <i>Дурьманов Н.В., Ибатуллин И.Д.</i> Повышение эффективности наливного оборудования для транспортировки нефтепродуктов железнодорожными составами..... | 85 |
| <i>Жилянин Я.А., Бабиев Ю.А., Цветков О.П.</i> Повышение стойкости протяжного инструмента посредством применения технологии криогенной обработки | 89 |
| <i>Куфаев В.Г.</i> О возможностях двухэтапной магнитно-абразивной обработки в области повышения качества деталей из немагнитных сплавов..... | 93 |
| <i>Морозов А.Ю., Павлов В.Ф., Прохоров А.А., Денискина Е.А.</i> Взаимосвязь эксплуатационных факторов с остаточными напряжениями и пределом выносливости | 98 |

| | |
|--|------------|
| <i>Синюков М.С.</i> Особенности магнитно-абразивной обработки с использованием постоянных магнитов: технология и применение | 103 |
| <i>Филипович О.В.</i> Задачи оптимизации показателей однопараметрической селективной сборки | 106 |
| Секция 3. Цифровые технологии в машиностроении и промышленном дизайне | 110 |
| <i>Батенков К.А.</i> Параметры задержек и потерь передаваемых пакетов в IP-сетях | 110 |
| <i>Володарский В.С.</i> Роль компьютерного моделирования в проектировании якорных швартовых шпилей | 113 |
| <i>Горобец И.А., Горбань В.В.</i> Эволюция функциональности дельта-принтера | 118 |
| <i>Горяинов Д.С., Климов А.В.</i> Повышение эффективности разработки управляющих программ для токарной обработки дисков ГТД с применением шаблона для групповой обработки в NX CAM | 124 |
| <i>Казаков М.С.</i> Применение методов машинного обучения и полносвязных нейронных сетей для прогнозирования свойств композиционных материалов | 127 |
| <i>Киселева М.И.</i> Разработка 3D-модели универсального календаря | 133 |
| <i>Кротинов Н.Б.</i> Особенности моделирования круглого фасонного резца в САПР КОМПАС-3D | 137 |
| <i>Никитин К.В., Константинов В.Н., Князев А.В.</i> Применение цифровых технологий при получении отливок художественного назначения | 144 |
| <i>Преображенский А.П., Никонорова Д.Д.</i> Комбинированный подход к управлению процессами производства на предприятии | 148 |
| <i>Свирень А.И., Черепашков А.А., Черноусова А.М.</i> Применение онтологического редактора Fluent Editor для создания таксономии пользовательского интерфейса 3D-моделирования в САПР КОМПАС-3D | 151 |
| <i>Сулейманова Ф.Д., Захаров О.В.</i> Анализ погрешности позиционирования 3D-принтера с параллельной кинематикой | 155 |
| <i>Услин Д.А.</i> Разработка 3D-модели и изготовление предмета интерьера | 158 |
| <i>Черепанова М.С.</i> Методические рекомендации по оценке потенциала непрофильных активов имущественного комплекса авиастроительного предприятия на основе алгоритмов нечетких множеств | 161 |
| Секция 4. Материаловедение и металлургия в современном машиностроении | 168 |
| <i>Андряшкин Д.В., Майдан Д.А.</i> Исследование возможности получения высокодисперсной керамической композиции AlN-TiC методом азидного СВС с применением меламин в качестве источника углерода | 168 |
| <i>Аникеев В.В.</i> Исследование влияния технологии плавки железоуглеродистых сплавов в установке индукционной плавильной на качество литого металла | 173 |
| <i>Волков К.Г., Дементьев В.Б., Мокрушина М.И.</i> Влияние высокотемпературной термомеханической обработки винтовым обжатием на структуру стали 60С2ХФА | 177 |
| <i>Григораш В.В., Болдырев А.А., Болдырев А.И.</i> Технические предпосылки создания металлофторопластов | 180 |
| <i>Гусев О.Н., Никитин К.В.</i> Особенности подготовки огнеупорных керамических форм к литью при использовании моделей, полученных средствами аддитивного производства | 184 |
| <i>Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И.</i> Модель зависимости плотности наполнителя композитного покрытия от плотности частиц SiC в электролите | 189 |
| <i>Каракич Е.А., Умеров Э.Р., Новиков В.А., Амосов А.П.</i> Получение керметов TiC-Cu сочетанием методов СВС и металлотермии | 193 |
| <i>Криницын М.Г., Новицкая О.С., Рюмин Е.Е.</i> Формирование композиционных материалов с содержанием МАХ-фаз Ti ₃ AlC ₂ и Ti ₃ SiC ₂ методом экструзионной аддитивной технологии | 198 |
| <i>Колибасов В.А., Ибатуллин И.Д., Новиков В.А.</i> Методы оценки износостойкости поликристаллических алмазных резцов | 201 |
| <i>Луц А.Р.</i> Жидкофазные способы получения алюмоматричных композиционных материалов, дисперсно армированных карбидными фазами | 205 |
| <i>Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С.</i> Термическая обработка крупногабаритных авиационных изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов | 209 |

| | |
|--|-----|
| <i>Парфенов К.В., Ибатуллин И.Д.</i> Исследование защитного действия ингибитора коррозии на основе порошкового модификатора из квазикристаллов системы Al-Cu-Fe для насосно-компрессорных труб | 214 |
| <i>Плеханов А.М., Майдан Д.А.</i> Исследование возможности получения высокодисперсной керамической композиции Si ₃ N ₄ -TiC методом азидного СВС с использованием меламина в качестве источника углерода..... | 218 |
| <i>Полегешко С.А., Ерисов Я.А., Клепов Д.Н., Арышенский Е.В.</i> Моделирование изменения кристаллографических ориентировок в процессе отбортовки..... | 223 |
| <i>Полегешко С.А., Левагина А.А., Кульковец В.А., Коновалов С.В., Арышенский Е.В.</i> Изменение механических свойств сплавов группы АЛТЭК в зависимости от термомеханической обработки | 227 |
| <i>Святкин А.В., Кондратьева Л.П.</i> Исследование влияния скорости охлаждения на микроструктуру и твердость специальной латуни ЛМцАЖКС | 230 |
| <i>Селеменев Р.Ю., Негодяев В.О., Мешков А.А., Никитин К.В.</i> Исследование сварных соединений образцов из жаропрочного никелевого сплава, полученных методом прямого лазерного выращивания, при изготовлении газотурбинных двигателей..... | 235 |
| <i>Шевченко С., Рожнятовский А.В., Брюховецкий А.Н., Коршенко К.В., Денисов Д.А.</i> Исследование антифрикционных углерод-углеродных композиционных материалов..... | 238 |
| <i>Шерина Ю.В., Луц А.Р.</i> Исследование влияния кремния на стабильность фазы TiC при получении методом СВС композиционного материала на основе промышленного сплава АК10М2Н | 243 |

Научное издание

Отв. ред. ГАЛЛЯМОВ Альберт Рафисович

**Высокие технологии в машиностроении:
материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции
с международным участием**

Редактор Е.С. Захарова

Компьютерная верстка М.В. Марченко

Выпускающий редактор Ю.А. Петропольская

Подписано в печать 15.05.25

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная

Усл. п. л. 14,6. Уч.-изд. л. 14,45

Тираж 50 экз. Рег. № 42/25

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