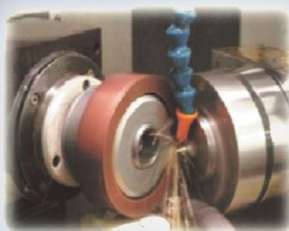


НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

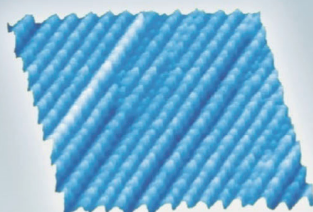
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

1 (163)
2025

ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ



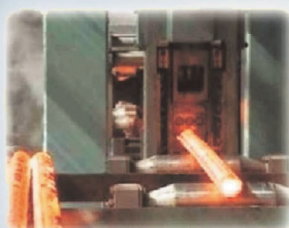
ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



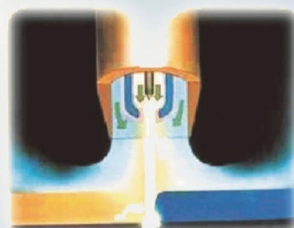
ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ



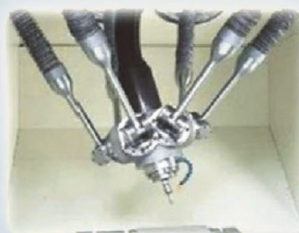
НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ



НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ



ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗАГOTOVK НА СТАНКАХ С ЧПУ
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 1 (163)

2025

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г. (г. Москва)

Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

д.т.н., чл.-корр. РАН ПРИХОДЬКО В.М.
(г. Москва)

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г. (г. Москва)

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БУЯНОВСКИЙ И.А. (г. Москва)

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

д.т.н., проф. ГУСЕЙНОВ Г.А. (г. Баку,
Азербайджан)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. КАВАЛЕК А.А. (г. Ченстохова,
Польша)

д.н., магистр наук КРЕХЕЛЬ Р. (г. Капушан,
Словакия)

д.т.н., проф. КУКСЁНОВА Л.И. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

д.т.н., акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк)

д.т.н., акад. НАН Беларуси МЫШКИН Н.К.

(г. Гомель, Беларусь)

д.т.н., проф. ОВЧИННИКОВ В.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПЕТРОВА Л.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. ФЕДОНИН О.Н. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., доц. ШОХИЁН А.Н. (г. Куляб, Таджикистан)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить по интернет-
каталогу "Пресса по подписке".

Подписной индекс: **Э79195**.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: editntm@yandex.ru

<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
26 апреля 2019 года
рег. номер ПИ № **ФС77-75524**

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Юсубов Ф.Ф. Анализ морфологии изношенной поверхности в
полимерно-матричных фрикционных композитах 3

Иванова Г.В., Цветкова Г.В., Тарасенко Е.А., Евсин М.Г.
Применение металлофизических методов аттестации материалов
роликвинтовой передачи. 9

СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Шляпин А.Д., Овчинников В.В., Учеваткина Н.В. О механизме
формирования микроструктуры композиционного материала при
сварке разнородных компонентов в режиме трения с перемешиванием 17

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Четвериков С.В. Повышение эффективности измельчения угольной
массы путём изменения геометрии ударной поверхности била. 26

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Курсевич Е.А., Абраменко Ю.С. Технологичность конструкций
изделий, получаемых методом аддитивных технологий. 33

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Бочкарев П.Ю. Метод отображения технологических возможностей
механообрабатывающего оборудования атрибутами теории графов. 38

*Журнал входит в перечень изданий ВАК, утвержденных для соискателей
ученых степеней по научным специальностям: 2.5.3 - Трение и износ в
машинах; 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки; 2.5.6 - Технология машиностроения; 2.5.7 -
Технология и машины обработки давлением; 2.5.8 - Сварка, родственные
процессы и технологии; 2.6.17 - Материаловедение (по отраслям)
(технические науки).*

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,
публикуемых в журнале «Наукоёмкие технологии в машиностроении»,
допускаются со ссылкой на источник информации и только
с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 1 (163)

2025

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s., prof. SUSLOV A.G. (Moscow)

Deputy chief editor

d.en.s., assoc. prof. SHALYGIN M.G. (Bryansk)

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIKHODKO V.M. (Moscow)

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGORYANTS A.G. (Moscow)

Editorial Committee:

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BUYANOVSKII I.A. (Moscow)

PhD., Dr. Engineer WALDENMAIER T.

(Stuttgart, Germany)

d.en.s., prof. HUSEYNOV H.A. (Baku,
Azerbaijan)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. KAWALEK A.A. (Czestochowa,
Poland)

PhD., Msc. KREHEL R. (Kapusany, Slovakia)

d.en.s., prof. KUKSENOVA L.I. (Moscow)

d.en.s., prof. LARIN S.N. (Tula)

d.en.s., Acad. RASLYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm)

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIKHAILOV A.N. (Donetsk)

d.en.s., MYSHKIN N.K. Acad. of NAS Belarus
(Gomel, Belarus)

d.en.s., prof. OVCHINNIKOV V.V. (Moscow)

d.en.s., prof. PETROVA L.G. (Moscow)

d.en.s., prof. SMOLENTSEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. FEDONIN O.N. (Bryansk)

d.en.s., prof. KHEIFETZ M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. TCHIGIR INSKY Ju.L. (Volgograd)

d.en.s., assoc. prof. SHOHYON A.N. (Kulob,
Tajikistan)

DOL:10.30987/issn.2223-4608

The magazine is distributed by subscription,
which can be issued through the online catalog
"Subscription Press".

Subscription index: **379195**.

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: editntm@yandex.ru

<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

**The journal is registered by the Federal
service for supervision of communications,
information technologies and mass
communications (Roskomnadzor)
26.04.2019 registration number
print publication № FS77-75524**

CONTENTS

MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Yusubov F.F. Analyzing the morphology of worn surfaces in polymer matrix
friction composites 3

Ivanova G.V., Tsvetkova G.V., Tarasenko E.A., Eysin M.G. Application of
metallophysical methods of certification of roller drive materials 9

WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES

Shlyapin A.D., Ovchinnikov V.V., Uchevatkina N.V. Speaking of mechanism
responsible for a composite material microstructure formation under welding of
heterogeneous components in a friction with stirring mode 17

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Chetverikov S.V. Increasing the efficiency of coal mass grinding by changing the
geometry of the impact surface of the grinding wheel 26

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

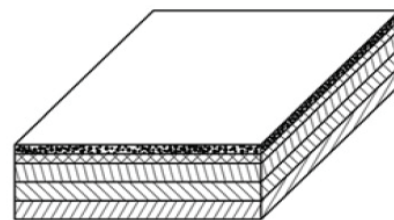
Kursevich E.A., Abramenko Yu.S. Workability of industrial products obtained
by fully additive technologies. 33

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS

Bochkarev P.Yu. A rendering method of technology options for machining
equipment through graph theory attributes. 38

The journal is included in the list of publications of the HAC approved for applicants of
academic degrees in scientific specialties: 2.5.3 - Friction and wear in machines;
2.5.5 - Technology and equipment of mechanical and physico-technical processing;
2.5.6 - Mechanical engineering technology; 2.5.7 - Technology and pressure treatment
machines; 2.5.8 - Welding, related processes and technologies; 2.6.17 - Materials
Science (by industry) (technical sciences).

**Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»**



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №1 (163). С.3-8.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №1 (163). P.3-8.

Научная статья

УДК 621.891

doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-3-8

Анализ морфологии изношенной поверхности в полимерно-матричных фрикционных композитах

Фикрет Фахрадди Юсубов, д.ф. в обл. техн.

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Баку, Азербайджан

fikratyusub@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В этом исследовании изучается топография поверхности и механизмы износа полимерных матричных фрикционных композитов, используемых в тормозных колодках. Анализируя микроскопические изображения и трехмерные профили износа поверхности, исследование выявляет ключевые процессы износа и образование частиц третьего тела, которые влияют на поведение трения. В исследованиях использовались образцы, приготовленные традиционными методами порошковой металлургии на основе фенолформальдегида. Эксперименты включали испытания трения в различных условиях, и результаты продемонстрировали отдельные фазы в изменении коэффициента трения, подчеркивая реакцию композита на различные напряжения. Морфология поверхности после испытаний выявила несколько механизмов износа, включая абразивный и адгезионный износ.

Ключевые слова: тормозные колодки, полимерно-матричные композиты, трение, износ, морфология поверхности

Для цитирования: Юсубов Ф.Ф. Анализ морфологии изношенной поверхности в полимерно-матричных фрикционных композитах // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 1 (163). С. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-3-8

Analyzing the morphology of worn surfaces in polymer matrix friction composites

Fikret F. Yusubov, PhD in Technology

Azerbaijan State University of Petroleum and Industry, Baku, Azerbaijan
fikratyusub@gmail.com

Abstract. This study examines the surface topography and wear mechanisms of polymer matrix friction composites used in brake pads. By analyzing microscopic images and three-dimensional surface wear profiles, the study identifies key wear processes and the formation of third body particles that influence the behavior of friction. The research used samples prepared by traditional methods of powder metallurgy based on phenol-formaldehyde. The experiments included friction tests under various conditions, and the results evidenced distinct phases in the variation of friction coefficient, being illustrative of the composite's response to various stresses. The morphology of the surface after testing revealed several wear mechanisms, including abrasive and adhesive wear.

Keywords: brake pads, polymer matrix composites, friction, wear, surface morphology

For citation: Yusubov F.F. Analyzing the morphology of worn surfaces in polymer matrix friction composites / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-3-8

Введение

Фрикционные композиты на основе полимерной матрицы – это материалы, разработанные для обеспечения оптимальных свойств трения и износа в таких областях применения, как тормозные колодки, сцепления и другие системы, связанные с трением. Эти композиты состоят из полимерной матрицы, армированной различными наполнителями и волокнами для улучшения фрикционных свойств и износостойкости [1]. В состав обычных фрикционных композитов в качестве связующего или матрицы входят фенольные смолы, которые обеспечивают хорошую термическую стабильность и механическую прочность. Наполнители, такие как графит, оксиды металлов и керамика, улучшают теплопроводность, фрикционную стабильность и износостойкость. Волокна, такие как арамид, углерод и стекло, повышают механическую прочность и долговечность [2]. Разработка фрикционных композитов на основе полимерной матрицы направлена на баланс трения, износа, шума и тепловых характеристик, что делает их критически важными в автомобильных и промышленных тормозных системах.

Морфологическая характеристика имеет решающее значение в контексте фрикционных композитов, поскольку она выявляет структурные детали, которые влияют на производительность [3]. Изучая распределение и ориентацию волокон и наполнителей в полимерной матрице, исследователи могут оптимизировать механическую прочность и фрикционные свойства композита. Наполнители в виде частиц, такие как керамические частицы, также играют решающую роль в повышении износостойкости, обеспечивая твердую фазу внутри более мягкой полимерной матрицы, которая устойчива к абразивному воздействию [4].

Высокая износостойкость означает менее частые замены, что экономически выгодно и сокращает отходы окружающей среды. Изучение структуры контактной поверхности очень важно, поскольку оно влияет на эффективную передачу нагрузки и определяет процесс изнашивания [5]. Понимание механизмов износа посредством детального анализа поверхности помогает в адаптации материалов для повышения износостойкости. Детальное структурное понимание помогает в оптимизации состава композита для лучшей производительности в различных приложениях.

В данном исследовании образцы тормозных колодок, изготовленные из компонентов на основе фенолформальдегида с низким содержанием металлов, были подвергнуты испытаниям на трение и проанализирована морфология контактной поверхности. Испытания на трение проводились в различных режимах для морфологических сравнений с целью исследования изношенных поверхностей.

Материалы и методы

Образцы для испытаний на трение были изготовлены в цилиндрической форме. Для приготовления образцов были выбраны следующие виды сырья: барит, фенольная смола, оксид алюминия, свинец, олово, порошок спеченный медно-графитовый композит (80 % Cu, 20 % C), диоксид кремния, синтетический волластонит, оксид магния, дисульфид молибдена и латунная стружка (0,1...0,2 мм). Процессы, использованные при приготовлении образцов, включают измельчение материала, механическое смешивание, прессование (25,5 МПа) и спекание (160°C). Сырье измельчали в лабораторном вибрационном шаровом мельнице, а затем порошкообразные материалы механически смешивали в горизонтальном барабанном смесителе (60 циклов/мин в течение 16 ч) в сухих условиях. При прессовании для уменьшения трения между частицами порошка и стенкой пресс-формы в качестве внешней смазки использовался парафин. Для улучшения прессуемости порошка в качестве внутренней смазки применялся глицерин (5...8 % масс.).

Экспериментальная часть

Испытания на сухое трение скольжения проводились с использованием вертикального трибометра MMW-1 по схеме «палец-диск» при комнатной температуре (25 °C). В этих испытаниях вращающиеся образцы прижимались к неподвижному диску из низкоуглеродистой стали с шероховатостью поверхности 0,2 мкм, как показано на рис. 1. Стальной диск имел внешний диаметр 31,7 мм, внутренний диаметр 16 мм и толщину 10 мм. Площадь контакта образца составила 17,35 мм². Перед испытанием поверхности образцов полировались под водой на вращающемся диске с использованием абразивных дисков SiC зернистостью 1000 и 2000.

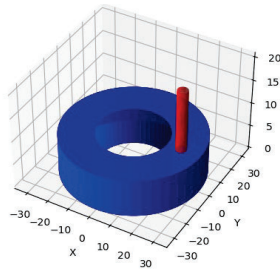


Рис. 1. Схема испытаний по схеме «палец–диск»

Fig. 1. Test pattern for the «finger–disk» scheme

Изображения под оптическим микроскопом были получены с использованием микроскопа AmScope (серия ME520) с программным обеспечением для микрофотографирования AmScope 3.7.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 и 2 представлены избранные режимы испытаний на трение и их результаты соответственно.

1. Условия испытания на трение для композитных образцов тормозных колодок

1. Friction test conditions for composite brake pad samples

Тест №	Нормальная нагрузка, Н	Скорость скольжения, м/с	Расстояние скольжения, км
1	50	2,50	1,275
2	100	1,57	1,590
3	150	0,64	0,960

2. Результаты испытаний на трение

2. Friction test results Figure

Тест №	Коэффициент трения μ	Скорость изнашивания, г/ч	Температура диска, °C
1	0,441	0,038	330...350 °C
2	0,374	0,018	330...350 °C
3	0,409	0,026	330...350 °C

Проведенные испытания показали, что характер изменения коэффициента трения очень близки друг к другу для всех режимов. Близость характеристик трения для всех режимов можно объяснить тем, что состав образцов одинаков. Однако разные режимы

повлияли на механизмы изнашивания. На рис. 2 представлены результаты испытания с самым длинным путем трения (тест 2). На графике можно выделить несколько фаз.



Рис. 2. Изменение коэффициента трения во времени

Fig. 2. Change of the friction coefficient within the period of time

Коэффициент трения изначально начинается с более низкого значения и резко увеличивается в течение начальной фазы (0...100 с), вероятно, из-за шероховатости поверхности или первоначального укладывания материала. В средней фазе (100...400 с) он значительно колеблется между 0,3 и 0,5, что указывает на нестабильное поведение трения, возможно, на

которое влияют изменения в контакте с поверхностью, изменения температуры или другие внешние факторы. В стабильной области (400...500 с) коэффициент трения стабилизируется около 0,4, что предполагает более постоянную силу трения, потенциально представляющую собой устойчивое состояние. Фаза спада (500...700 с) показывает

постепенное снижение коэффициента трения, что может быть результатом износа, полировки поверхности, термических эффектов или распада смазки. Наконец, в последней фазе (700...800 с) коэффициент трения стабилизируется на более низком значении, что указывает на то, что система достигла нового равновесия или фрикционный материал значительно

изношен или претерпел фазовое изменение. На рис. 3 показаны оптические изображения контактных поверхностей фрикционных композитов с полимерной матрицей после прохождения испытаний на трение. Каждое изображение представляет различные топографии поверхности и механизмы износа, которые развились в определенных условиях испытаний.

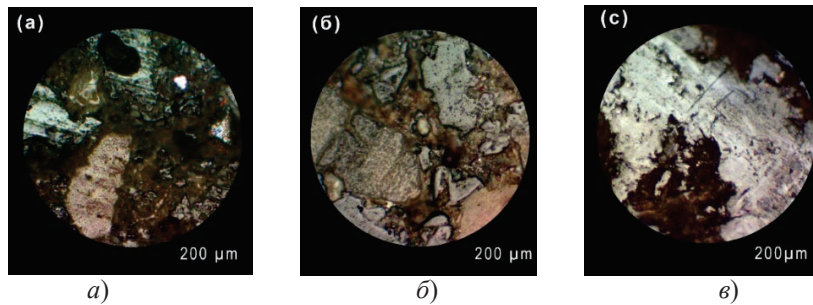


Рис. 3. Оптические изображения контактной поверхности после испытания на трение:
а – тест № 1; б – тест № 2; в – тест № 3

Fig. 3. Optical images of the contact surface after the friction test:
а – test No. 1; б – test No. 2; в – test No. 3

Различные топографии и механизмы износа указывают на свойства композита к различным фрикционным напряжениям и условиям. Контактное напряжение в контексте композитов тормозных колодок относится к распределению напряжений на границе между тормозной колодкой и ротором при применении тормозов [6]. Представленные оптические изображения дают четкое визуальное различие между механизмами износа, действующими на фрикционные композиты с полимерной матрицей, которые показывают различные закономерности износа – абразивный и адгезионный износ.

Присутствие более крупных, более ярких частиц на рис. 3, а предполагает обнажение более твердых армирующих материалов

внутри полимерной матрицы. Более темные области могут указывать на области, где более мягкая полимерная матрица была преимущественно изношена, обнажая внедренные частицы или наполнители. Вторая изношенная поверхность показывает более равномерный износ с уплощенными областями, что указывает на более гладкие области, которые могли быть подвергнуты более постоянному скользящему контакту (рис. 3, б). Более темные пятна предполагают наличие остатков износа или локального размазывания полимерной матрицы, возможно, из-за механизмов адгезионного износа, где произошел перенос материала между контактными поверхностями. Этот процесс можно лучше визуализировать на контурной и трехмерной карте износа (рис. 4.).

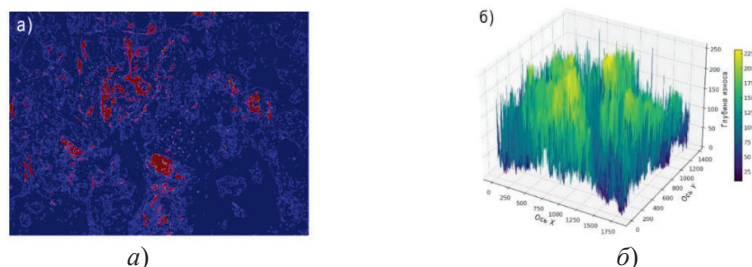


Рис. 4. Карта износа (а) и топографический поверхностный график глубины износа образца тормозной колодки (б)

Fig. 4. Wear map (а) and topographic surface graph of the wear depth of the brake pad sample (б)

Контурный график (рис. 4. б) выделяет пятна износа на поверхности с более темными областями, указывающими на области

значительной разницы в шероховатости. Эти более темные области предполагают механизмы износа, возможно, из-за частиц износа

или неравномерного распределения нагрузок во время торможения. На рис. 5 представлены результаты ЭДС анализа слоев трения, наблюдаемых на поверхности износа для испытания № 2.

Представленный спектр EDS подчеркивает присутствие таких ключевых элементов, как углерод С, кислород О, медь Cu, свинец Pb, барий Ba, магний Mg, марганец Mn, олово Sn и алюминий Al, которые являются неотъемлемой частью структуры и характеристик композитного материала. Наличие указанных элементов в слое трения указывает на возможность адгезионного износа.

Трехмерный график поверхности иллюстрирует глубину износа по всей композитной поверхности. Профиль износа характеризуется высокими пиками и глубокими впадинами, что указывает на сильное удаление материала и

деградацию поверхности. Изменение в значении серого указывает на разницу в глубине износа, при этом более высокие пики представляют области с меньшим износом, а более глубокие впадины показывают области с более значительным удалением материала. Наличие адгезия между контактирующими поверхностями может вызвать скольжение поверхностей в процессе трения, требующее приложения дополнительной силы, а также отрыв материала от поверхности. Неравномерная глубина износа свидетельствует о том, что процесс износа не является однородным, что может быть обусловлено такими факторами, как неоднородность материала, колебания температуры или наличие изношенных частиц.

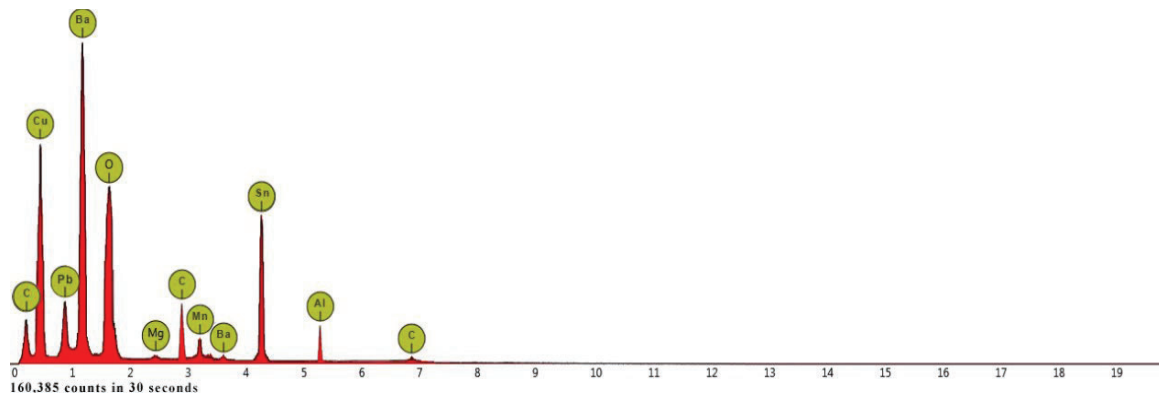


Рис. 5. Спектральный анализ EDS слоя трения на изношенной поверхности

Fig. 5. Spectral analysis of the EDS friction layer on the worn surface

Представленный спектр EDS подчеркивает присутствие таких ключевых элементов, как углерод С, кислород О, медь Cu, свинец Pb, барий Ba, магний Mg, марганец Mn, олово Sn и алюминий Al, которые являются неотъемлемой частью структуры и характеристик композитного материала. Наличие указанных элементов в слое трения указывает на возможность адгезионного износа.

Трехмерный график поверхности иллюстрирует глубину износа по всей композитной поверхности. Профиль износа характеризуется высокими пиками и глубокими впадинами, что указывает на сильное удаление материала и деградацию поверхности. Изменение в значении серого указывает на разницу в глубине износа, при этом более высокие пики представляют области с меньшим износом, а более глубокие впадины показывают области с более значительным удалением материала. Наличие адгезия между контактирующими

поверхностями может вызвать скольжение поверхностей в процессе трения, требующее приложения дополнительной силы, а также отрыв материала от поверхности. Неравномерная глубина износа свидетельствует о том, что процесс износа не является однородным, что может быть обусловлено такими факторами, как неоднородность материала, колебания температуры или наличие изношенных частиц.

На изображении рис. 3, в виден более выраженный механизм абразивного износа с видимыми царапинами или канавками на поверхности. Эта топография предполагает присутствие более твердых абразивных частиц, возможно, третьего тела, которые создали микроканавки в результате вспахивания. Контактное давление на поверхность «палеца», контактирующую со стальным диском, находилось в пределах 1...10 МПа. Материал из фенольной смолы должен эффективно работать при таких

нагрузках, обеспечивая надежное трение и тормозное усилие, сохраняя при этом долговечность. Стальной аналог, будучи намного прочнее, вряд ли испытает какую-либо деформацию под этим напряжением.

Выводы

Анализ поверхности изнашивания тормозного фрикционного композита выявил сложное взаимодействие механизмов изнашивания, включая абразивный и адгезионный износ. Во всех тестах на трение исследование выявило отдельные фазы динамики коэффициента трения, включая первоначальное быстрое увеличение, за которым следовали значительные колебания, период стабилизации и возможное снижение. Наличие абразивного износа, о котором свидетельствуют видимые канавки и царапины, позволяет предположить, что абразивные частицы третьего тела играют роль в процессе износа, особенно в более агрессивных условиях испытаний. Адгезионный механизм изнашивания наблюдался в местах, где происходил перенос материала между контактными поверхностями, что приводило к локальному размазыванию полимерной матрицы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pujar V., Devarajaiah R.M., Suresha B., Bharat V. A review on mechanical and wear properties of fiber-reinforced thermoset composites with ceramic and lubricating fillers / *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 46, P. 7701–7710.
2. Parikh H.H., Gohil P.P. Tribology of fiber reinforced polymer matrix composites – A review / *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, Vol. 34, № 16, P. 1340–1346.
3. Byeong-Choon G., In-Sik C. Microstructural analysis and wear performance of carbon-fiber-reinforced SiC

composite for brake pads / *Materials*, 2017, Vol. 10, № 7, p. 701.

4. Шакина А.В., Фадеев В.С., Штанов О.В. Вагонные тормозные колодки повышенной износостойкости // *Техника железных дорог*, 2014. Том 4, С. 28.

5. Ostermeyer GP., Müller M., Abendroth H., Wernitz B. Surface topography and wear dynamics of brake pads / *SAE Technical Paper*; 2006 Oct 8. P. 1–26.

6. Afzal A., Sirajuddin M., Kumar M., Moolya N.I. Stress analysis and contact pressure distribution in different disc brake rotors / *In AIP Conference Proceedings. Emerging trends In mechanical engineering 10–11 August 2018. Karnataka, India Vol. 2080, №. 1. P. 040001–8.*

REFERENCES

1. Pujar V., Devarajaiah R.M., Suresha B., Bharat V. A review on mechanical and wear properties of fiber-reinforced thermoset composites with ceramic and lubricating fillers / *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 46, P. 7701–7710.
2. Parikh H.H., Gohil P.P. Tribology of fiber reinforced polymer matrix composites – A review / *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, Vol. 34, № 16, P. 1340–1346.
3. Byeong-Choon G., In-Sik C. Microstructural analysis and wear performance of carbon-fiber-reinforced SiC composite for brake pads / *Materials*, 2017, Vol.10, № 7, p. 701.
4. Shakina A.V., Fadeev V.S., Shtanov O.V. Railcar brake shoes with increased wear resistance. *Railway Engineering*, 2014, vol. 4, p. 28.
5. Ostermeyer GP., Müller M., Abendroth H., Wernitz B. Surface topography and wear dynamics of brake pads / *SAE Technical Paper*; 2006 Oct 8. P. 1–26.
6. Afzal A., Sirajuddin M., Kumar M., Moolya N.I. Stress analysis and contact pressure distribution in different disc brake rotors / *In AIP Conference Proceedings. Emerging trends In mechanical engineering 10–11 August 2018. Karnataka, India Vol. 2080, №. 1. P. 040001–8.*

Статья поступила в редакцию 08.09.2024; одобрена после рецензирования 06.10.2024; принята к публикации 31.10.2024.

The article was submitted 08.09.2024; approved after reviewing 06.10.2024; assepted for publication 31.10.2024.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №1 (163). С.9-16.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №1 (163). P.9-16.

Научная статья

УДК: 621.83

doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-9-16

Применение металлофизических методов аттестации материалов роликвинтовой передачи

Галина Валерьевна Иванова¹, С.Н.С
Галина Викторовна Цветкова², К.Т.Н.
Елена Александровна Тарасенко³, К.Т.Н.
Марк Геннадьевич Евсин⁴, К.Т.Н.

^{1, 2, 3, 4} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

¹ galura@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5069-2060>

² tsvetkova_gv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5774-2609>

³ taraselen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ mark.evsin1995@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2403-9386>

Аннотация. Работа посвящена выбору методов определения материалов, применяемых для изготовления роликвинтовой передачи в рамках импортозамещения. Использовались современные методы исследования – оптическая и растровая электронная микроскопия, измерения микротвердости с применением автоматического микротвердомера. В результате измерения микротвердости материала роликвинтовой передачи было получено ее увеличение от 779HV в центре до 835 HV на зубьях детали. На основе проведенных металлографических исследований получена микроструктура мелкоугольчатого мартенсита с ярко выраженными цепочками карбидов хрома, молибдена, ванадия с микротвердостью 1200...1500 HV. При использовании микрорентгеноспектрального анализа с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN LYRA 3 с системой микроанализа Ultim MAX была получена информация о точечном химическом составе материала образца, наблюдались следы выпадения карбидов из матрицы с низкими вязко-пластичными свойствами. Даны рекомендации о подходящих отечественных материалах-аналогах. Результаты исследований могут быть использованы в конструктивных решениях по проектированию и модернизации машин и механизмов.

Ключевые слова: ролик, роликвинтовая передача, линейный привод, микротвердость, химический состав, микроструктура

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

Для цитирования: Иванова Г.В., Цветкова Г.В., Тарасенко Е.А., Евсин М.Г. Применение металлофизических методов аттестации материалов роликвинтовой передачи // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 1 (163). С. 9–16. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-9-16

Application of metallophysical methods of certification of roller drive materials

Galina V. Ivanova¹, SRF
Galina V. Tsvetkova², PhD Eng.
Elena A. Tarasenko³, PhD Eng.
Mark G. Evsin⁴, PhD Eng.

^{1, 2, 3, 4} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

¹ galura@yandex.ru

² tsvetkova_gv@mail.ru

³ taraselen@mail.ru

⁴ mark.evsin1995@yandex.ru

Abstract. The paper is devoted to the selection of methods for determining the materials used for the manufacture of roller drive in the framework of import substitution. Modern research methods were used such as optical and scanning electron microscopy, microhardness measurements using an automatic microhardness tester. As a result of measuring the microhardness of the roller drive material, the authors obtained an increase from 779HV in the center to 835HV on the teeth of the part. Based on metallographic studies, the microstructure of fine-neededled martensite with well-defined chains of chromium, molybdenum, and vanadium carbides with a microhardness of 1200...1500 HV has been obtained. In case of microrentgenospectral analysis using a TESCAN LYRA 3 scanning electron microscope with the Ultim MAX microanalysis system, information was obtained on the point chemical composition of the sample material, traces of precipitation of carbides from a matrix with low visco-plastic

properties were observed. Recommendations are given on suitable domestic analog materials. The research results can be used in constructive solutions for the design and modernization of machines and mechanisms.

Keywords: roller, roller drive, linear actuator, microhardness, chemical composition, microstructure

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

For citation: Ivanova G.V., Tsvetkova G.V., Tarasenko E.A., Eysin M.G. Application of metallophysical methods of certification of roller drive materials / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 9–16. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-9-16

Введение

Роликовинтовая передача – это механизм, использующийся для преобразования вращения входного вала в возвратно-поступательное движение выходного звена, например, штока. Она состоит из роликов, которые расположены между двумя резьбовыми поверхностями выполняющими, по своей сути роль винта и гайки. За счет замены скольжения качением достигается значительное снижение сил трения при сохранении высокой нагрузочной способности. Такая особенность роликовинтовых передач позволила использовать их в линейных электромеханических приводах (рис. 1), которые приходят на смену классическим гидро- и пневмоприводам [1]. Основными преимуществами электромеханических приводов являются: повышение качества позиционирования, повышение энергоэффективности, снижение эксплуатационных расходов, отсутствие утечек рабочей жидкости, повышение надежности за счет уменьшения количества компонентов системы [2].

К областям применения роликовинтовых передач и приводов на их основе относятся: машиностроение, например, робототехника, высокоточные станки с числовым программным управлением, электрическая строительная техника, авиационная и космическая промышленность, энергетика и др. [4 – 5].

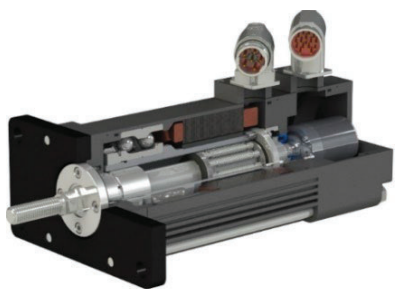


Рис. 1. Линейный электромеханический привод [3]

Fig. 1. Linear electromechanical drive [3]

Ограничением для увеличения объема применения роликовинтовых передач является

сложность технологического процесса их производства, с учетом сложной формы поверхностей тел качения и высоких требований к характеристикам используемого материала. Для обеспечения максимального ресурса изделия необходимо достижение высокой твердости и низкой шероховатости поверхностей трения. Обеспечение данных показателей обычно достигается термической обработкой с последующей обработкой шлифованием. Существуют различные методы термообработки заготовок, например, объемная закалка, закалка токами высокой частоты, цементация, азотирование и др. Известна научная работа, выполненная компанией «Диаконт», в которой рассматривается применение азотирования для изготовления элементов роликовинтовой передачи [6]. Азотирование поверхности подходит для усовершенствования технических параметров углеродистых и легированных сталей, содержащих углерод в концентрации 0,3...0,5 % включительно [7]. Получаемая микроструктура поверхностного слоя изделия, насыщенная азотом, содержит растворённые нитриды и приобретает повышенную коррозионную стойкость и высокую микротвёрдость, но и высокую хрупкость поверхностного слоя, что снижает качество и производительность обработки [8, 9]. Кроме того, это длительная и дорогостоящая операция.

Также в отечественной промышленности активно применялись приводы зарубежного производства, выпускаемые компанией Exlar. Привод, частью которого являлась данная передача, применялся в системе регулирования паровой турбины. Учитывая, что поставка зарубежной продукции в текущей политико-экономической ситуации не представляется возможной, актуально и целесообразно изучить и перенять подходящий опыт зарубежных коллег в части выбора материалов и методов термообработки компонентов роликовинтовых передач.

Таким образом целью исследования является выбор материала для изготовления роликов планетарной роликовинтовой передачи.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся материал ролика (рис. 2), использовавшегося в

планетарной роликовинтовой передаче, произведенный компанией Exlar. В работе был рассмотрен материал сталь с содержанием углерода около 1 %.

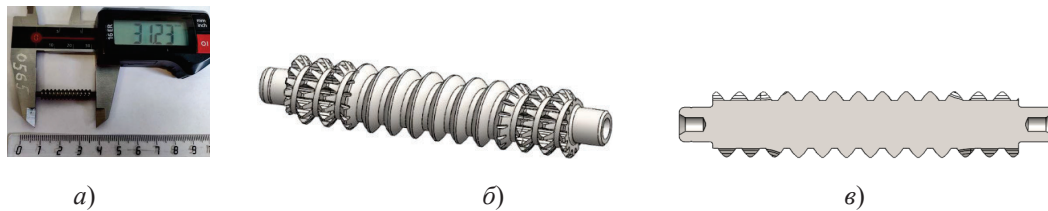


Рис. 2. Исследованный образец:

a – внешний вид образца; *б* – трехмерная модель ролика по геометрическим параметрам; *в* – трехмерная модель ролика в разрезе

Fig. 2. The studied sample:

a – Physical configuration of the sample; *b* – a three-dimensional model of the roller according to geometric parameters; *c* – a three-dimensional model of the roller in the section

Для металлографических исследований материала, ролик был разрезан электроэрозионным методом на две части вдоль оси. Первый образец (половина детали) использовался для измерения геометрических параметров образца. Второй образец – для изготовления шлифов, измерения микротвердости, определения содержания углерода и точечного химического состава материала. Для проведения металлографических исследований образцы материала были химически протравлены 4 % раствором азотной кислоты в спирте. Анализ условного размера зерна был проведен по стандартной методике ASTM E1382 – 97, ASTM E112.

Для более точного определения содержания углерода в образце материала был проведен общий анализ путем сжигания пробы

материала. Содержание углерода 1,08 %, содержание серы 0,0004 %.

Для определения микротвердости материала использовался автоматический микротвердомер FM-300. Микрорентгеноспектральный анализ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN LYRA 3 с системой микроанализа Ultim MAX.

Эксперимент

В результате измерения микротвердости образца материала получено распределение микротвердости, среднее значение по образцу равно 779 HV, а вблизи зубчатой части ролика микротвердость выше и в среднем составляет 835 HV, (рис. 3, табл. 1).

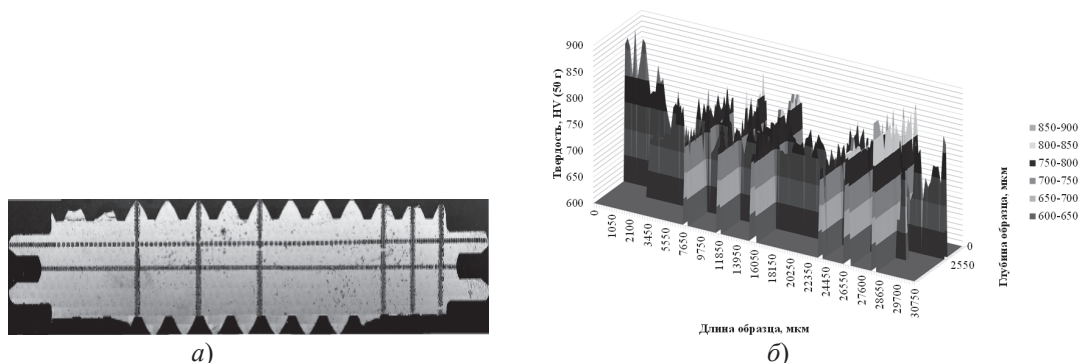


Рис. 3. Распределение микротвердости по материалу образца (8 дорожек):

a – панорама образца с нанесенными точками измерений; *б* – график распределение микротвердости

Fig. 3. Microhardness distribution over the sample material (8 tracks):

a – panorama of the sample with the measurement points plotted; *b* – graph of microhardness distribution

1. Микротвердость материала ролика

1. Microhardness of the roller material

Значения	Номер дорожки образца							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее значение HV (50 г)	767	782	786	773	789	835	754	739
Стандартное отклонение	20,4	25,6	21,7	21,3	17,5	39,3	51,6	38,8
Доверительный интервал (95 %)	7,33	9,2	7,93	7,77	6,51	14,6	9,27	8,22
Относительная точность, %	0,96	1,18	1,01	1,01	0,83	1,75	1,23	1,11
Размах значений	96,7	107	78,2	110	77,4	178	309	209

При проведении металлографических исследований удалось определить микроструктуру материала (рис. 4, *a – в*), а также границы, формы и размеры зерен и включений (рис. 4, *д, е*). Микроструктура представляет собой мелкоигольчатый мартенсит, включающий

в себя карбиды, которые можно видеть на не-травленной поверхности (рис. 4, *з*).

Средний диаметр зерна составил 3...4 мкм, что говорит о мелкозернистой структуре материала.

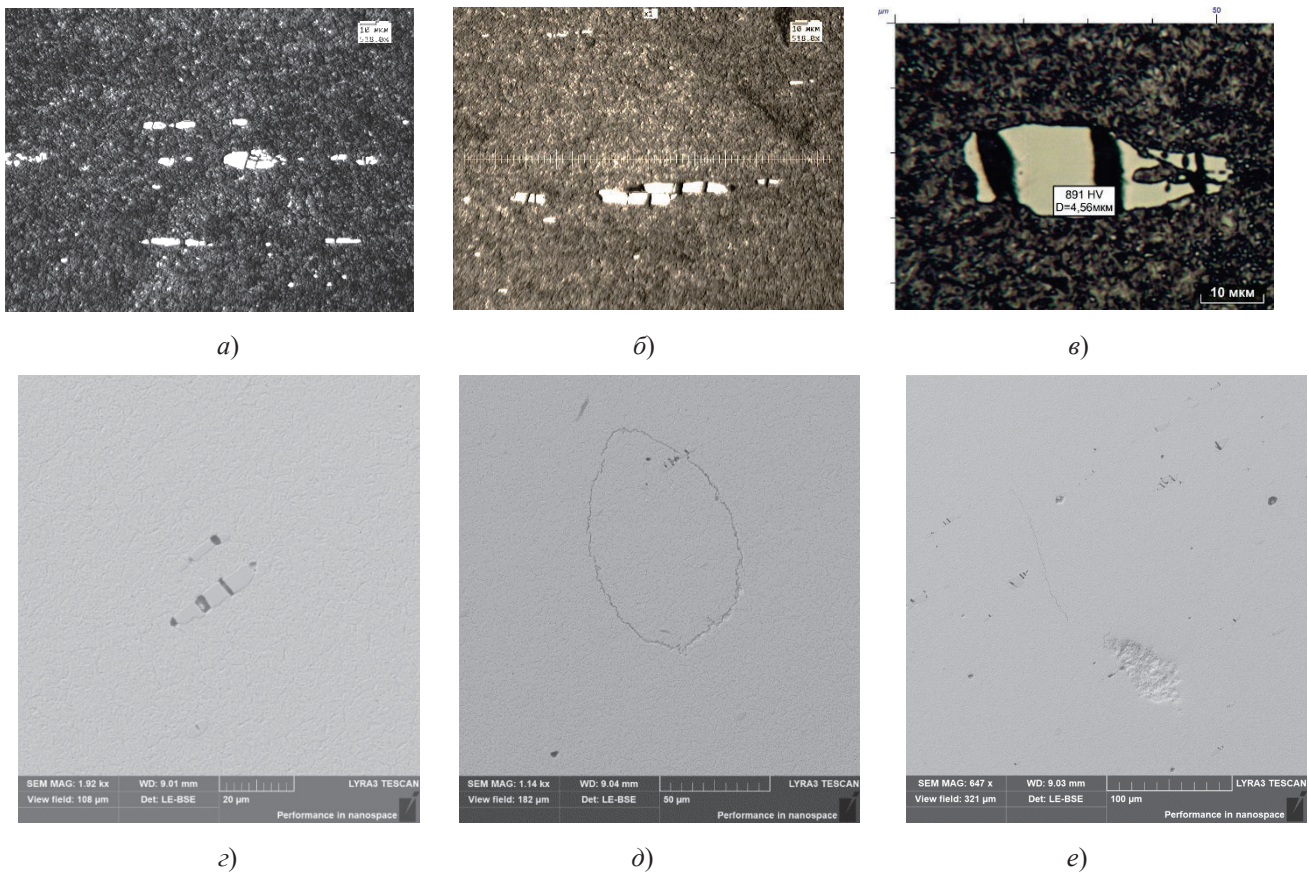


Рис. 4. Микроструктура поверхности образца:

a, б – изображения микроструктуры поверхности образца с карбидами; *в* – изображения микроструктуры и значения микротвердости карбидов; *г, д, е* – панорама поверхности с кавернами после выпавших включений

Fig. 4. Microstructure of the sample surface:

a, b – images of the microstructure of the sample surface with carbides; *c* – images of the microstructure and microhardness values of carbides; *d, e, f* – panorama of the surface with cavities after the fallen inclusions

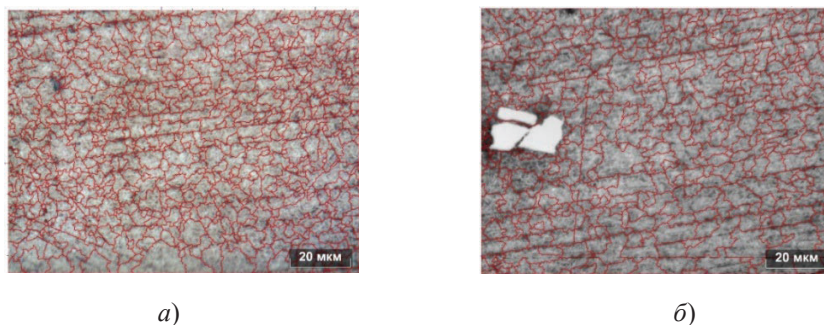


Рис. 5. Снимки поверхности образца (а) с сеткой для определения размера зерна (б)

Fig. 5. Sample surface images (a) with a grid for determining grain size (b)

3. Размеры зерен

3. Grain sizes

Величина	Значение	
	рис. 5, а	рис. 5, б
Общее количество измеренных зерен, n	443	703
Количество зерен на 1 мм^2 , m	45216	71753
Средняя площадь зерна, $a \text{ мм}^2$	0,000022 (22 мкм ²)	0,000014 (14 мкм ²)
Стандартное отклонение, s	24,3	13,8
95% доверительный интервал, 95% CI	2,31	1,04
Относительная точность, % RA	10,4	7,5
Номер зерна, G	12,51	13,18
Средний условный размер зерна, l	4,19 мкм	3,33 мкм

При проведении микрорентгеноспектрального анализа с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN LYRA 3 с системой микроанализа Ultim MAX была получена информация о точечном химическом составе материала образца. Химический состав однороден по всему образцу, дополнительно исследованы выступающие рельефные карбиды и черные включения (табл. 4). Были

проведены исследования черных включений на поверхности образца, которые при выпадении образуют каверны, края неровные в мелких трещинах, это может говорить о том, что карбиды выпали из матрицы мелкоигольчатого мартенсита, который обладает высокой твердостью и слабыми вязкими свойствами, т. е. матрица не может удерживать карбиды.

4. Содержание химических элементов в материале, в процентах

4. The content of chemical elements in the material, in percentage terms

Элементы	Поверхность	Карбиды	Черные включения
Si	0,4	0,1	0,3
V	0,2	4,3	0,9
Cr	5,8	42,2	16,3
Mn	0,8	1,0	0,9
Fe	91,5	46,8	79,1
Ni	0,0	0,1	0,1
Mo	1,2	5,4	2,3
W	0,1	0,2	0,0

Обсуждение результатов

Опираясь на результаты, полученные при исследовании зарубежного образца, можно сделать вывод о целесообразности применения отечественного материала с аналогичными химическим составом и свойствами.

Исходя из микроструктуры материала образца и полученной микротвердости, можем рассмотреть сталь инструментальную быстрорежущую марки P18. Основное свойство этой стали высокая теплостойкость, которая обеспечивается введением вольфрама и других карбидообразующих элементов-хрома, молибдена, ванадия. В результате легирования инструменты из таких сталей сохраняют высокую твердость, допускают более производительные режимы резания, чем из углеродистых и низко легированных сталей. Микроструктура быстрорежущей стали марки P18 после окончательной термической обработки может быть следующей (рис. 6, а, б): мартенсит отпуска и первичные карбиды [10]. После выдержки при температуре 1230 °С в течение 2 мин, охлаждения в воде, отпуска при 500 °С два раза по 1 ч, охлаждении в воде, получается твердость 841HV.

При этом в микроструктуре несколько крупных частиц расположены цепочками. Температура отпуска лежит в районе вторичного твердения. Очень мелкодисперсные выделения вызывают потемнение структуры. Расположение карбидов ванадия указывает на ориентацию исходных мартенситных игл. Карбиды ванадия настолько мелки, что невозможно судить об их форме. Светлые и круглые частицы соответствуют карбидам типа Me_6C . Для уменьшения карбидной неоднородности и улучшения эксплуатационной стойкости материалов рекомендовано использование порошковых технологий.

При сравнении химического состава исследуемого материала (содержание углерода 1,08 %), со справочными данными было выявлено, что ближайшими из широко применимых аналогов могут быть подшипниковые стали (табл. 5). Микроструктура материала исследованного образца аналогична микроструктуре шарикоподшипниковой стали ШХ15 после закалки с низким отпуском (рис. 6, в), с микроструктурой, состоящей из мартенсита игольчатого с частицами карбидов [10].

5. Химический состав сплавов

5. Chemical composition of alloys

Элементы	9Х5ВФ	Х6ВФ	P18	ШХ15
Si	0,1...0,4	0,15...0,35	0,2...0,5	0,17...0,37
V	0,15...0,3	0,5...0,8	1...1,4	0,17...0,37
Cr	4,5...5,5	5,5...6,5	3,8...4,4	1,3...1,65
Mn	0,15...0,4	0,15...0,4	до 0,5	0,2...0,4
Fe	от 90,4	остальное	остальное	остальное
Mo	—	до 0,3	до 1,0	—
W	0,8...1,2	1,1...1,5	17...18,5	—
Ni	—	до 0,35	до 0,4	до 0,3
C	0,85...1	1,05...1,15	0,73... 0,83	0,95...1,05
S	до 0,03	до 0,03	до 0,03	до 0,02
P	до 0,03	до 0,03	до 0,4	до 0,027
Cu	—	до 0,3	—	до 0,25
Co	—	—	до 0,5	—

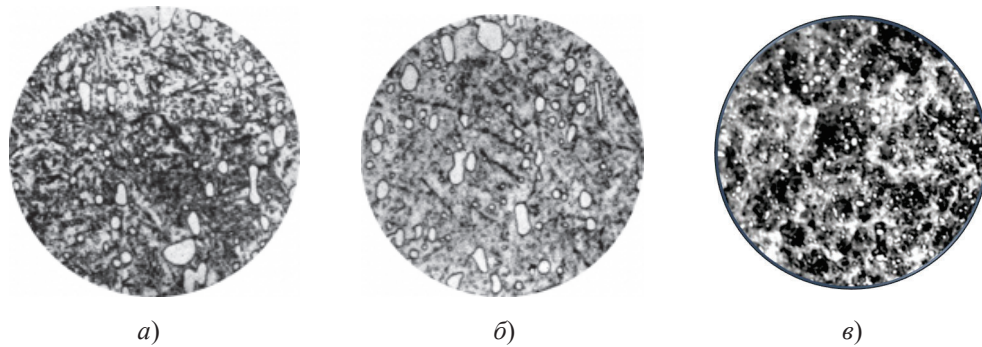


Рис. 6. Структура схожих марок сталей:

a, б – сталь P18 после отпуска; *в* – сталь ШХ15 после закалки с низким отпуском, увеличение $\times 1000$

Fig. 6. The structure of similar grades of steels:

a, b – HSS 18 after temper; *c* – roller-bearing steel Cr15 after quenching with low tempering, an increase of $\times 1000$

Так близким материалом, имеющим структуру мелкоигольчатого мартенсита с включениями карбидов, является подшипниковая сталь ШХ15, для которой характерны высокая твердость, износостойкость, сопротивление контактной усталости в сочетании с хорошей вязкостью после сложной термической обработки (закалка с температуры 840...860 °C в масло, нагретое до 60 °C, отпуск при 150...170 °C). Эти выгодные нам свойства позволяют рекомендовать сталь ШХ15 в качестве аналога зарубежного материала ролика.

Исходя из химического состава исследованного образца, в качестве материала – заменителя могут быть использованы сталь инструментальная легированная 9Х5ВФ и сталь инструментальная штамповая Х6ВФ. При сравнении микроструктуры материала образца с упомянутыми сталями при оценке карбидной неоднородности отожженных образцов стали видим соответствие со шкалой 2 ГОСТ 5950-2000, т. е. слабо выраженная полоччатость, тонкие строчки карбидов. Эти стали подходят по твердости и механическим свойствам, используются для изготовления ножей, инструмента для холодной деформации.

Закключение

Таким образом, в результате использования металлофизических методов аттестации металлических материалов предложены подходы к решению проблемы выбора отечественных материалов для изготовления ролика роликвинтовой передачи в рамках импортозамещения.

Применялись экспериментальный и аналитический методы выбора материалов с

требуемыми характеристиками. При выборе материала были использованы заданные нами определенные требования к самому материалу. Затем эти требования мы сравнили со свойствами материалов, известными из литературных источников или полученными в результате испытаний. В итоге были отобраны материалы, удовлетворяющие всем сформулированным требованиям.

В результате исследования получили следующие критерии: химический состав исследуемого материала (содержание углерода 1,08 %, что сразу исключает применение азотирования), микроструктуру материала образца (мелкоигольчатый мартенсит с включениями карбидов), а также микротвердость (среднее значение 779 HV, вблизи зубчатой части ролика микротвердость составляет 835 HV). Для дальнейшей разработки изготовления роликов роликвинтовой передачи были выбраны наиболее перспективные следующие отечественные материалы: после соответствующей термической обработки требуемые свойства могут показать быстрорежущая сталь P18, подшипниковая сталь ШХ15, инструментальная легированная сталь 9Х5ВФ и инструментальная штамповая сталь Х6ВФ.

Практическая значимость работы состоит в предложенном методе подбора отечественного материала вместо зарубежного с подходящими по микротвердости, микроструктуре, химическому составу и свойствам. Материалы статьи будут полезными в области машиностроения, например, в электрической строительной технике, авиационной и космической промышленности, энергетике и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексанин С.А. и др. Перспективы развития технологии и рынка приводных решений: куда движется привод // Современные технологии управления. 2013. №. 11 (35). С. 1–12.
2. Уваров М.М., Магдиев Р.Р. Алгоритм обработки технологии изготовления детали роликовинтовой передачи на токарном автомате «Швейцарского» типа // Металлообработка. 2014. №. 4 (82). С. 45–49.
3. Электромеханические приводы [Электронный ресурс] URL: <https://szd-e.ru/elektromekhanicheskie-privody-emp/> (дата обращения 06.10.2024).
4. Промышленность – Exlar [Электронный ресурс] URL: <https://www.cw-actuation.com/en-gb/industries> (дата обращения 06.10.2024).
5. Роликовинтовые передачи SKF каталог [Электронный ресурс] URL: https://avsnab.ru/uploads/manufacture_document/file/699/PB_P_SKF.pdf (дата обращения 06.10.2024).
6. Иваненко А.О., Тулькова И.А., Уваров М.М. Технологические особенности азотирования резьбовых поверхностей ответственных деталей электромеханического привода // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. №. 4. С. 360–367.
7. Husson R. et al. Consideration of residual stress and geometry during heat treatment to decrease shaft bending // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Т. 72. С. 1455–1463.
8. Куксенова Л.И., Алексеева М.С., Козлов Д.А. Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 3 (141). С. 23–37. DOI 10.30987/2223-4608-2023-23-37. EDN BRVZVU.
9. Петрова Л.Г., Белашова И.С. Газоциклические процессы химико-термической обработки: регулирование строения азотированного слоя в железе и сталях // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 3–14. DOI 10.30987/2223-4608-2024-3-14. EDN SOPPKT.
10. Атлас микроструктур черных и цветных металлов и сплавов: учебное наглядное пособие для студентов вузов группы специальностей 74 06 Агроинженерия / БГАТУ, Кафедра технологии металлов; [сост.: А. А. Андрушевич и др.]. Минск, 2012. 97 с.
11. Сталь инструментальная быстрорежущая [Электронный ресурс] URL: <https://markmet.ru/strukturi-stalei/386> (дата обращения 21.10.2024).

REFERENCES

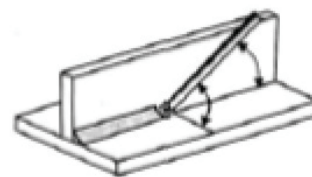
1. Aleksanin S.A. et al. Prospects for the development of technology and the market for drive solutions: where is the drive heading // Modern control technologies. 2013. No. 11 (35). P. 1–12.
2. Uvarov M.M., Magdiev R.R. Algorithm for developing the technology for manufacturing a roller-screw transmission part on a Swiss-type lathe // Metalworking. 2014. No. 4 (82). P. 45–49.
3. Electromechanical drives [Electronic resource] URL: <https://szd-e.ru/elektromekhanicheskie-privody-emp/> (accessed 06.10.2024).
4. Industry – Exlar [Electronic resource] URL: <https://www.cw-actuation.com/en-gb/industries> (date of access 06.10.2024).
5. Roller screw drives SKF catalog [Electronic resource] URL: https://avsnab.ru/uploads/manufacture_document/file/699/PB_P_SKF.pdf (date of access 06.10.2024).
6. Ivanenko A.O., Tulkova I.A., Uvarov M.M. Technological features of nitriding of threaded surfaces of critical parts of an electromechanical drive // Bulletin of higher educational institutions. Instrument engineering. 2018. Vol. 61. No. 4. P. 360–367.
7. Husson R. et al. Consideration of residual stress and geometry during heat treatment to decrease shaft bending // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 72. Pp. 1455–1463.
8. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S., Kozlov D.A. Dependence of performance indicators of nitrided steels on the structural state of the surface layer // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. No. 3 (141). Pp. 23–37. DOI 10.30987/2223-4608-2023-23-37. EDN BRVZVU.
9. Petrova L.G., Belashova I.S. Gas-cyclic processes of chemical-thermal treatment: regulation of the structure of the nitrided layer in iron and steels // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. No. 7 (157). P. 3–14. DOI 10.30987/2223-4608-2024-3-14. EDN SOPPKT.
10. Atlas of microstructures of ferrous and non-ferrous metals and alloys: a teaching aid for university students of the group of specialties 74 06 Agroengineering / BSATU, Department of Metal Technology; [compiled by: A. A. Andrushevich et al.]. Minsk, 2012. 97 p.
11. High-speed tool steel [Electronic resource] URL: <https://markmet.ru/strukturi-stalei/386> (date of access 10/21/2024).

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.11.2024; одобрена после рецензирования 30.11.2024; принята к публикации 12.12.2024.

The article was submitted 10.11.2024; approved after reviewing 30.11.2024; assepted for publication 12.12.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №1 (163). С. 17-25.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №1 (163). P. 17-25.

Научная статья
УДК 621.7/620.3
doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-17-25

О механизме формирования микроструктуры композиционного материала при сварке разнородных компонентов в режиме трения с перемешиванием

Анатолий Дмитриевич Шляпин¹, д.т.н.

Виктор Васильевич Овчинников², д.т.н.

Надежда Владимировна Учеваткина³, к.х.н.

^{1, 2, 3} Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ 6883412@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0600-5737>

² vikov1956@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2948-2202>

³ uchevatkina@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4772-6170>

Аннотация. Рассмотрена проблема формирования соединения при фрикционной обработке композиционных материалов на основе несмешивающихся компонентов. Показана роль полос адиабатического сдвига (ПАС) во взаимодействии с элементами, формирующими композиционный материал. Описаны эффекты миграции тяжелых легкоплавких компонентов по ПАС со скоростями намного превышающие скорости традиционной диффузии, позволяют по-новому взглянуть на возможности эффекта сварки трением с перемешиванием не только как на эффективный метод сварки, но также как на основу альтернативной технологии производства сплавов несмешивающихся компонентов в массивных образцах. Установлено, что температура в зоне перемешивания была достаточно высокой для интенсивного образования твердых растворов и интерметаллидных фаз. Структура таких частиц формировалась под воздействием нагрева и интенсивной пластической деформации в условиях возможной реализации двух механизмов миграции компонентов – диффузионного и миграционного по ПАС, воспроизводимых при каждом обороте инструмента. Увеличение содержания свинца в композиционном материале с 5 до 44 % привело к снижению коэффициента трения с 0,28 до 0,13. Основное снижение коэффициента трения композиционного материала системы Al–Pb достигается в интервале содержания свинца 0...30 % масс. Развитие обсуждавшейся выше альтернативной технологии производства композиционных материалов (КМ) специального назначения предусматривает два взаимосвязанных направления – расширение номенклатуры новых функциональных КМ используя уникальные возможности технологии СТП и уточнение механизма структурно-фазовых превращений, лежащих в основе этой технологии. В частности, очевидно, что в дополнительном исследовании нуждаются и механизм, и кинетика формирования ПАС и их роли в формировании микроструктуры и свойств композитов.

Ключевые слова: фрикционная обработка, композиционный материал, несмешивающиеся компоненты, полосы адиабатического сдвига, система Al–Pb, коэффициент трения

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FZRR-2023-0005 «Разработка основополагающих технологических принципов применения концентрированных потоков энергии для получения новых импортозамещающих композиционных материалов специального назначения на основе систем несмешивающихся компонентов», экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования Московского политехнического университета.

Для цитирования: Шляпин А.Д., Овчинников В.В., Учеваткина Н.В. О механизме формирования микроструктуры композиционного материала при сварке разнородных компонентов в режиме трения с перемешиванием // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 1 (163). С. 17–25. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-17-25

Speaking of mechanism responsible for a composite material microstructure formation under welding of heterogeneous components in a friction with stirring mode

Anatoly D. Shlyapin¹, D.Eng.

Viktor V. Ovchinnikov², D. Eng.

Nadezhda V. Uchevatkina³, PhD. Eng.

^{1, 2, 3} Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

¹ 6883412@mail.ru

² vikov1956@mail.ru

³ uchevatkina@yandex.ru

Abstract. The problem of joint formation under friction treatment of composite materials based on immiscible components is viewed. The role of adiabatic shear bands (AShB) in the interaction with the elements forming the composite material is shown. The effects of migration of heavy low-melting components compared to adiabatic shear bands at speeds much higher than the speeds of traditional diffusion are described, making possible to take a fresh look at the possibilities of the effect of friction welding with stirring not only as an effective welding method, but also as the basis for an alternative technology for the production of alloys for immiscible components in bulk samples. It was found that the temperature in the stirring zone was high enough for intensive formation of solid solutions and intermetallic phases. The structure of such particles was formed under the influence of heating and intense plastic deformation under the conditions of the possible implementation of two mechanisms of component migration – diffusion and migration ones along AShB, reproduced with each rotation of the tool. An increase in the lead content in the composite material from 5 to 44 % led to a decrease in the coefficient of friction from 0,28 to 0,13. The main reduction in the coefficient of friction of the composite material of the Al – Pb system is achieved in the range of lead content of 0...30 wt. %. The development of the alternative technology for the production of special-purpose composite materials (CM) discussed above provides for two interrelated directions - expanding the range of new functional CM using the unique capabilities of FSW technology and clarifying the mechanism of structural and phase transformations underlying this technology. In particular, it is obvious that the mechanism and kinetics of AShB formation and their role in the formation of the microstructure and properties of composites need additional research.

Keywords: friction treatment, composite material, immiscible components, adiabatic shear bands, Al–Pb system, friction coefficient.

Acknowledgements: The material was prepared within the framework of scientific research under project No. FZRR-2023-0005 «Development of fundamental technological principles for the use of concentrated energy flows to obtain new import-substituting composite materials for special purposes based on immiscible component systems», experimental studies were conducted using equipment from the shared use center of the Moscow Polytechnic University.

For citation: Shlyapin A.D., Ovchinnikov V.V., Uchevatkina N.V. Speaking of mechanism responsible for a composite material microstructure formation under welding of heterogeneous components in a friction with stirring mode / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 17–25. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-17-25

Введение

Композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов (НК) обладают рядом уникальных свойств [1]. Недавно появились новые интересные и перспективные направления, основанные на применении достижений нанотехнологий, позволяющие создавать уникальные материалы данного класса для изделий малого размера (пленки, покрытия, макрочастицы). Следует отметить, что при этом остается актуальной проблема создания массивных изделий из материалов на основе НК.

Среди наиболее перспективных направлений работ в этой области были чаще других называют технологии, основанные на

применении концентрированных потоков энергии (КПЭ) различного вида. К ним в первую очередь можно отнести применение лазеров, электронно-лучевого, электроимпульсного и ударно-волнового воздействия, механическое легирование. Также рассматривался в качестве наиболее перспективного для получения объемных изделий из НК метод сварки трением с перемешиванием (СТП).

Анализ структурных и фазовых превращений, происходящих под воздействием названных источников энергии, в частности и особенно в сплавах на основе НК, показал, что в большинстве случаев формирование структуры может проходить при участии полос адиабатического сдвига (ПАС). В данной

статье мы рассмотрим каким образом ПАС могут влиять на взаимодействие компонентов при формировании структуры и рассмотрим некоторые примеры и перспективы применения СТП для производства КМ, получение которых традиционными методами затруднено или невозможно.

Феноменологические исследования процессов скоростной пластической деформации металлов позволили установить, что деформация протекает негомогенно и сконцентрирована в узких полосах сдвига. Локализация пластического сдвига является следствием резких структурных изменений в материалах и может сопровождаться полиморфными превращениями, фрагментацией, ориентационной и ротационной неустойчивостью. При этом адиабатический нагрев может вызвать значительное повышение температуры в локализованном объеме и снижение локального предела текучести. Малые времена делают процесс близким к адиабатическому. Области сильно локализованной пластической деформации называют полосами адиабатического сдвига (ПАС). Пластическая деформация в области ПАС достигает $\sim 100\%$, а скорость деформации составляет $10^6 \dots 10^8 \text{ с}^{-1}$ [2, 3].

Известно, что полосы адиабатического сдвига (далее ПАС) – образуются в сравнительно небольшой области образцов, при высоких нагрузках и при интенсивных сдвиговых деформациях. Они часто ведут к разрушению материалов, и это одна из причин, почему очень важно учитывать и понимать эти процессы. Они наблюдались во многих физических экспериментах, включая пробивание материалов при высоких скоростях. Исследование образования полос адиабатического сдвига является трудной задачей из-за больших напряжений, сопровождающих процесс, возникающих высоких температур при изучении различного рода материалов. Трудностью проведения экспериментальных работ является также и то, что процессы носят локальный характер и происходят с очень большой скоростью.

ПАС взаимодействуют с элементами, из которых сформирован композиционный материал. Эта особенность заключается в том, что одним из общих свойств процесса локализации пластической деформации является

массоперенос различного рода частиц к местам локальной повреждаемости и полосы адиабатического сдвига не являются исключением.

В работах [4, 5] при изучении микроструктуры полос локализованной деформации в алюминиевых и медных сплавах, а также сталях обнаружен эффект, названный авторами самозалечиванием. Он состоит в том, что из матричного материала в зону ПАС мигрируют элементы внедрения (O, C) и частицы упрочняющей фазы. Эта миграция сопровождается созданием очень тонкого слоя, примыкающего к ПАС, обогащённого названными элементами и снижением микротвёрдости в слоях по обе стороны от полос деформации.

Описанные выше эффекты миграции тяжёлых легкоплавких компонентов по ПАС со скоростями намного превышающие скорости традиционной диффузии позволяют по-новому взглянуть на возможности эффекта сварки трением с перемешиванием не только как на эффективный метод сварки, но также как на основу альтернативной технологии производства сплавов несмешивающихся компонентов в массивных образцах.

Область локализации ПАС может составлять примерно от 1 до 500 мкм. Аккомодация сильной пластической деформации при образовании ударных кратеров, обтекании и пробивании баллистических стержней в толстых мишенях, формировании кумулятивных зарядов, а также при различных видах сварки и обработки трением также происходит путем развития локализованных или перекрывающихся полос адиабатического сдвига.

Установлено, что процессе фрикционной обработки наблюдается формирование многочисленных ПАС [6 – 8].

Целью данного исследования являлось изучение механизма формирования композиционного материала на базе несмешивающихся компонентов систем Al – Pb, Al – Cu и роль в этом процессе полос адиабатического скольжения (ПАС).

Материалы и методы исследований

Формирование композиционных материалов на базе несмешивающихся компонентов систем Al – Pb, Al – Cu с помощью фрикционной обработки осуществляли в

соответствии со схемой, представленной на рис. 1 [9]. Процесс введения свинца в алюминий при синтезе композиционного материала системы Al – Pb возможно осуществлять в два этапа: на первом этапе проходом

инструментом без стержня осуществляется закрытие паза, а на втором этапе – инструментом со стержнем, собственно, осуществляется формирование композиционного материала.

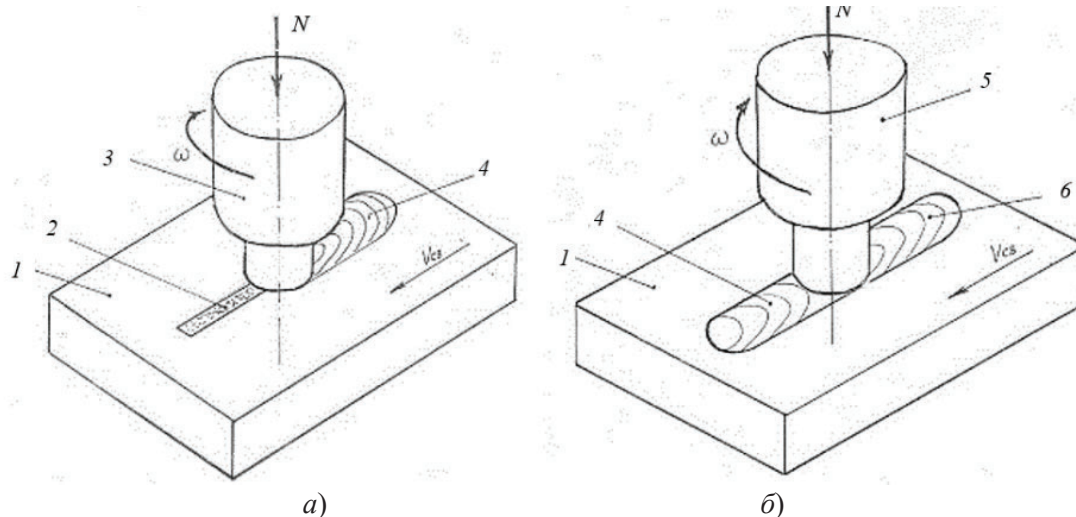


Рис. 1. Схема получения композиционного материала системы Al – Pb с помощью сварки трением с перемешиванием:

a – закрытие паза со свинцовым порошком; *б* – проход инструментом со стержнем для получения композиционного материала; *1* – пластина из алюминиевого сплава 1565чН2; *2* – паз с порошком свинца; *3* – рабочий инструмент без стержня; *4* – закрывающий паз шов; *5* – инструмент со стержнем; *6* – шов, состоящий из композиционного материала системы Al – Pb; *N* – осевое усилие на рабочий инструмент; ω – частота вращения рабочего инструмента

Fig. 1. Scheme of obtaining composite material of the Al – Pb system by FSW:

a – closing the groove with lead powder; *b* – using a tool with a rod to obtain composite material: *1* – aluminum alloy plate 1565CIN2; *2* – groove with lead powder; *3* – working tool without a rod; *4* – seam closing the groove; *5* – tool with a rod; *6* – seam consisting of a composite material of the Al – Pb system; *N* – axial force on the working tool; ω – rotation frequency of the working tool

Для реализации метода использовали пластины из алюминиевого сплава 1565чН2 размерами 200×100×6 мм. Механические свойства листов и плит сплава 1565чН2 в

соответствии со стандартами и механические свойства полуфабрикатов, используемых в исследовании, приведены в табл. 1 и 2.

1. Механические свойства листов из сплава 1565ч по стандартам

1. Mechanical properties of 1565CI alloy sheets according to standards

Полуфабрикат, толщина	Состояние поставки	Механические свойства		
		Временное сопротивление σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Лист, 3...6 мм	М	335	170	15
	H2 (H116)	360	255	10

2. Механические свойства листов сплава 1565ЧН2 (Н116)

2. Mechanical properties of alloy sheets 1565CIN2(N116)

Полуфабрикат, толщина	Направление вырезки образцов	Механические свойства				
		Временное сопротивле- ние σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относитель- ное удлинение δ , %	Угол изгиба α , °	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
Лист, 6 мм	Поперечное	$\frac{380...400}{388}$	$\frac{288...305}{294}$	$\frac{11,2...12,3}{11,8}$	—	—
	Продольное	$\frac{395...410}{400}$	$\frac{320...330}{323}$	$\frac{12,0...13,5}{12,5}$	110/90*	—
Примечания: * – диаметр пуансона $D = 3t/2t$, где t – толщина образца; ** – диаметр пуансона $D = 2t$.						

В общем случае ширина сварного шва зависела от размера заплечика используемого рабочего инструмента. Все сварные соединения, исследованные в данной работе, были

выполнены инструментами, которые формировали для листов толщиной 6,0 мм шов шириной ~16 мм. Режимы сварки образцов приведены в табл. 3.

3. Режимы сварки трением с перемешиванием листов сплава 1565ЧН2 (Н116)

3. FSW modes for alloy sheets 1565CIN2 (N116)

Полуфабрикат, толщина	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Угол наклона инструмента в плоскости стыка (против часовой стрелки), °	Усилие прижатия буртика инструмента к поверхности деталей, кН
Лист, 6 мм	550...900	125...300	3	1,5...1,8

Сварку трением с перемешиванием осуществляли на лабораторной установке, изготовленной на базе вертикального фрезерного станка с ЧПУ и дополнительно оснащенного индикатором вертикального перемещения фрезерной головки. Для сварки использовался инструмент, выполненный из быстрорежущей стали, со штифтом конусообразной формы и винтовой линией.

Длину наконечника инструмента выбирали таким образом, чтобы она была на 0,1...0,15 мм меньше толщины свариваемого металла. Сварку выполняли углом вперед при

наклоне инструмента относительно вертикальной оси на 2...3 °. С помощью суппорта закрепленный на валу электродвигателя инструмент перемещался в вертикальной плоскости, благодаря чему обеспечивалось необходимое заглубление его рабочих частей в свариваемый материал, и поддерживалась постоянная величина осевого усилия его прижатия к соединяемым деталям в процессе сварки. Свариваемые листы надежно фиксировались на стальной подкладке подвижного стола.

Образцы для оптической металлографии и ориентационной микроскопии

вырезались таким образом, чтобы исследуемая поверхность была перпендикулярна направлению сварки. Металлографические наблюдения осуществлялись на оптическом микроскопе Olympus GX-71.

Фрактографическое изучение поверхности изломов, разрушенных образцов после механических испытаний проводили методами оптической и растровой электронной микроскопии. Электронную микроскопию производили с помощью растрового электронного микроскопа сверхвысокого разрешения evo-50 фирмы «Karl Zeiss», укомплектованного системой энергодисперсионного микроанализа, позволяющего производить картирование по элементному составу.

Твердость полученных слоев оценивали твердомером Виккерса при нагрузке 1 кг. При этом твердость определяли как поперек швов, так и на поверхности швов.

Были проведены также испытания на трение и изнашивание упрочненных слоев на поршневом трибометре SRV с вращательной измерительной камерой по схеме трения шар – плоскость в соответствии с требованиями ASTM G133-02.

Для обеспечения наиболее высокой температуры процесса (и, соответственно, гарантированного растворения частиц вторичных фаз в зоне перемешивания) было решено использовать максимальную частоту вращения, допустимую на установке для СТП, использованной в данной работе.

Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим примеры получения образцов КМ методом СТП для систем сплав 1565чН2 – медь, сплава 1565чН2 – свинец и сплава 1565чН2 – олово. На рис. 2 приведен фрагмент микроструктуры композиционного материала 1565чН2-медь, получающегося в результате одного прохода инструмента.

Из рис. 2 достаточно четко видно, что температура в зоне перемешивания была достаточно высокой для интенсивного образования твёрдых растворов и интерметаллидных фаз. Диаметр наблюдаемых частиц на основе меди находится в диапазоне 3 до 8 мкм. Структура таких частиц формировалась под воздействием нагрева и интенсивной пластической

деформации в условиях возможной реализации двух механизмов миграции компонентов – диффузионного и миграционного по ПАС, воспроизводимых при каждом обороте инструмента.

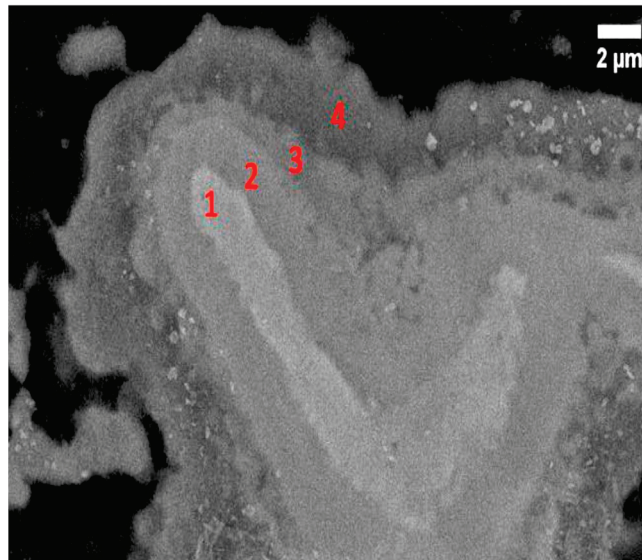


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия типичной частицы меди в центральной части зоны перемешивания сплава 1565чН2

Fig. 2. Scanning electron microscopy of a typical copper particle in the central part of the mixing zone of alloy 1565чН2

Четыре слоя, наблюдаемых в частице демонстрируют последовательность ее вовлеченности в процесс структурно-фазовых превращений при вращении и поступательного движения инструмента. Чем темнее слой на изображении, тем больше алюминия в нем содержится. Слой 1 содержит преимущественно медь в своем составе. По мере перехода от 2 к 4 слою содержание алюминия возрастает. Темная область за пределами частицы – это алюминиевый сплав 1565чН2, содержащий в своем составе примерно 5,6 % Mg.

Слоистое строение зоны сформированного композита на рис. 3 подтверждает возможность реализации механизма адиабатического сдвига.

Для получения КМ алюминий-свинец и олово-свинец применяли иную схему СТП (рис. 4). Диапазон частот вращения рабочего инструмента и скоростей сварки приняли равными 700...900 об/мин и 125...200 мм/мин соответственно.

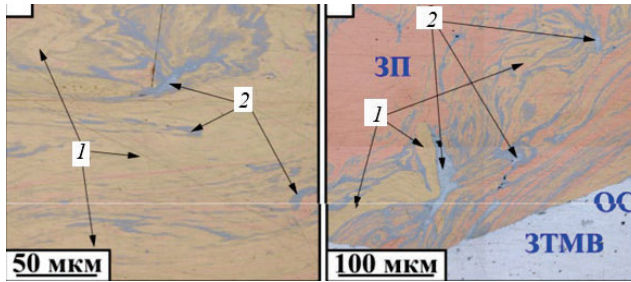
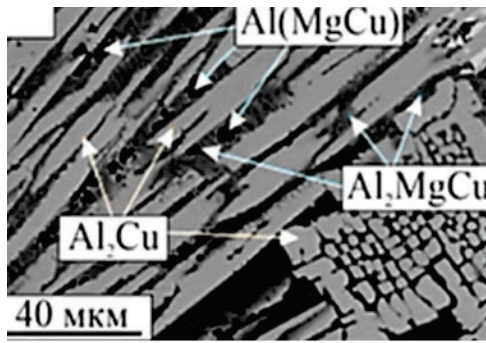


Рис. 3. Изображение областей твердого раствора и интерметаллидных фаз в металлографическом и электронном микроскопе:

1 – области меди; 2 – области алюминия

Fig. 3. Image of solid solution regions and intermetallic phases in a metallographic and electron microscope:

1 – copper regions; 2 – aluminum regions

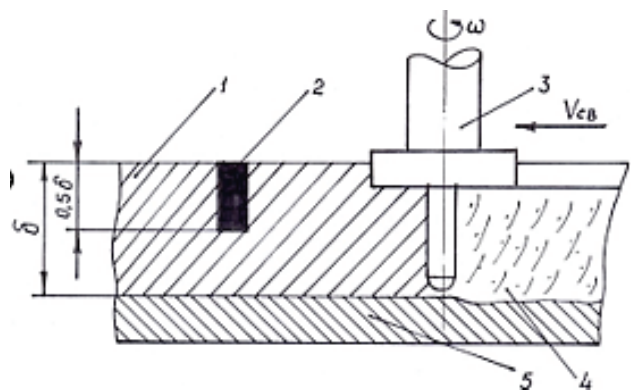


Рис. 4. Схема осуществления эксперимента по получению КМ алюминий – свинец и алюминий – олово путем СТП:

1 – пластина из сплава 1565чН2; 2 – столбик из легкоплавкого металла (олово, свинец) диаметром 4 мм; 3 – рабочий инструмент; 4 – зона перемешивания (шов композиционный материал); 5 – подкладка

Fig. 4. Scheme of the experiment on obtaining aluminum – lead and aluminum – tin CM by using FSW: 1 – a plate made of alloy 1565чН2; 2 – a column of low-melting metal (tin, lead) with a diameter of 4 mm; 3 – a working tool; 4 – a stirring zone (seam composite material); 5 – backing jig

Приведенная на рис. 5 структура представлена двумя основными видами составляющих – крупной, в виде контура границ зерен и более дисперсной – внутризеренной. Первая образуется в результате течения пластифицированного алюминиевого сплава за рабочим инструментом и оттеснения более тугоплавкими зёрнами алюминия жидкого свинца на границы зерен, где он затем кристаллизуется в виде прослоек. Вторая предположительно является следствием миграции свинца по ПАС, образующимся непрерывно в процессе поступательного движения и вращения инструмента.

За счет варьирования ширины и глубины паза были получены композиционные материалы системы Al – Pb с массовым содержанием свинца в пределах 0...44 % масс.

Испытания на трение и изнашивание упрочненных слоев на поршневом трибометре SRV с вращательной измерительной камерой по схеме трения шар – плоскость проводили в соответствии с требованиями ASTM G133-02. Установлено, что увеличение содержания свинца в композиционном материале с 5 до 44 % привело к снижению коэффициента трения с 0,28 до 0,13 (рис. 5).



Рис. 5. Влияние содержания свинца в композиционном материале Al – Pb на коэффициент трения (без смазки)

Fig. 5. Influence of lead content in Al – Pb composite material on the friction coefficient (no lubrication)

Провели также оценку объемного износа на двухъядерном конфокальном интерферометрическом микроскопе Leica в сравнении с образцом из алюминиевого сплава 1565чН2. Установлено, что на пути сухого трения 1765 м изношенный объем сплава 1565чН2 составил 0,96 мм³, в то время как для композиционного материала системы Al – Pb с содержанием свинца 25 % масс. только 0,43 мм³.

Приведенные выше результаты убедительно подтверждают возможность применения метода СТП в качестве эффективного технологического приема для создания широкого спектра композиционных материалов, в том числе на основе систем несмешивающихся компонентов. При этом допускается самое разнообразное сочетание соединяемых компонентов. Так, вместо лунок, содержащих легкоплавкий компонент, можно размещать навески нанопорошков. Сочетая таким образом диамагнитную или парамагнитную матрицу с равномерно распределенным порошком ферромагнетика получать постоянные магниты специального назначения. Перечень подобных сочетаний с целью получения разнообразных функциональных композитов достаточно велик.

Дисперсность структурных составляющих композитов, получаемых с помощью СТП, можно целенаправленно изменять (увеличивать) путем последующего воздействия электроимпульсной обработкой. Инициацию ПАС импульсным воздействием на зону контакта разнородных металлов мы наблюдали не раз. Однако в литературе имеются сведения о том, что при определенных условиях электроимпульсное воздействие на зону контакта может подавлять формирование ПАС [10].

Изучали воздействие электрических импульсов на сплавы Cu – Pb и Al – Pb; плотность тока в импульсе составляла 10 кА/см². На рис. 6, а показана микроструктура литого сплава Cu – 36 % масс. Pb. Это типичная микроструктура монотектического сплава, в котором благодаря не очень большой разнице удельных масс компонентов ликвация по удельной массе не успевает проходить во всем объеме.

Изменения в микроструктуре в результате ЭИО заметны уже после пяти импульсов (рис. 6, б). Они выражаются в том, что распределение становится более однородным и исчезают аномально крупные включения.

Очевидно, что в заготовках композиционных материалов, полученных методом СТП, можно применяя соответствующую термообработку, при необходимости изменять не только дисперсность структурных составляющих, но и фазовый состав.

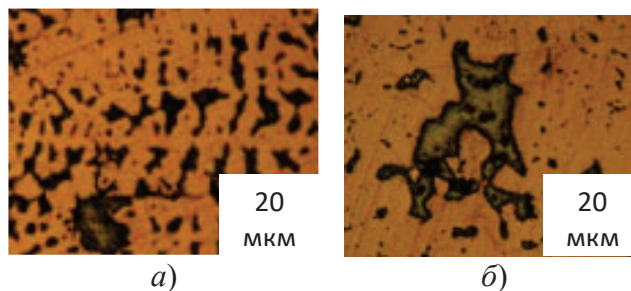


Рис. 6. Микроструктура сплава Cu – 36 % масс. Pb: а – исходное состояние; б – после ЭИО (5 импульсов)

Fig. 6. Microstructure of Cu – 36 % alloy weight Pb: а – initial state, b – after EIT (5 pulses)

Закключение

Разработан метод получения композиционных материалов на базе несмешивающихся компонентов на основе процесса сварки трением с перемешиванием (фрикционной обработки).

Разработанным методом получены композиционные материалы системы Al – Pb с содержанием свинца в диапазоне 0...44 % масс. Показано, что основное снижение коэффициента трения композиционного материала системы Al – Pb достигается в интервале содержания свинца 0...30 % масс. Наиболее рациональным следует считать массовое содержание свинца в материале на уровне 15...30 % масс.

Установлено, что на пути сухого трения 1765 м изношенный объем сплава 1565чН2 составил 0,96 мм³, в то время как для композиционного материала системы Al – Pb с содержанием свинца 25 % масс. только 0,43 мм³, т. е. износостойкость повысилась более, чем в 2 раза.

Развитие обсуждавшейся выше альтернативной технологии производства КМ специального назначения предусматривает два взаимосвязанных направления – расширение номенклатуры новых функциональных КМ используя уникальные возможности технологии СТП и уточнение механизма структурно-фазовых превращений, лежащих в основе этой технологии. В частности, очевидно, что в дополнительном исследовании нуждаются и механизм, и кинетика формирования ПАС и их роли в формировании микроструктуры и свойств композитов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии (теория, технология, структура и свойства): Монография. М.: Интерконтакт наука, 2002. 372 с.
2. Wingrove A.L. A Note on the Structure of Adiabatic Shear Bands in Steel: Journal of Australian Institute of Metals. 1971. vol. 16. P. 67–70.
3. Walley S.M. Shear Localization: A Historical Overview, Metallurgical and materials transactions A, 38A, (2007), pp. 2629–2654.
4. Буравова С.Н. Эффект самозалечивания откольной повреждаемости, Журнал технической физики, 2017, том 87, вып. 10. С.1502–1509.
5. Буравова С.Н., Петров Е.В., Сайкова Г.Р., Алымов М.И. Физико-химические процессы, сопровождающие локализацию пластической деформации при импульсном нагружении. Доклады академии наук, 2018, том 481. № 6. С. 634–637.
6. Овчинников В.В., Дриц А.М. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием соединений алюминий-магния системы Al–Mg // Научно-ёмкие технологии в машиностроении. 2019. №3. С. 7–19.
7. Kumar R. Material flow visualization and determination of strain rate during friction stir welding / R. Kumar, V. Pancholi, R.P. Bharti // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. Vol. 255. P. 470–476.
8. Ren S.R. Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al–Mg–Si alloy / S.R. Ren, Z.Y. Ma, L.Q. Chen // Scripta Materialia. 2007. Vol. 56. P. 69–72.
9. Патент на изобретение RU №2828266 от 20.12.2023. Способ получения композиционных материалов из несмешивающихся компонентов на основе технологии сварки трением с перемешиванием. / Овчинников В.В., Шляпин А.Д., Курбатова И.А. Лукьяненко Е.В. Учеваткина Н.В. Якутина С.В. Опубликовано: 08.10.2024 Бюл. № 28.
10. Ma Z.Y., Feng A.H., Chen D.L. & Shen J. (2017): Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, DOI: 10.1080/10408436.2017.1358145

REFERENCES

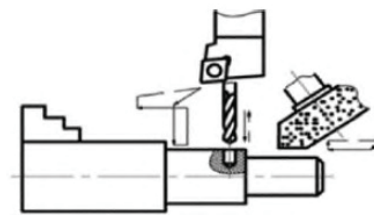
1. Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. Alloys based on systems with limited solubility in the liquid state (theory, technology, structure and properties): Monograph. Moscow: Interkontakt nauka, 2002. 372 p.
2. Wingrove A.L. A Note on the Structure of Adiabatic Shear Bands in Steel: Journal of Australian Institute of Metals. 1971. vol. 16. P. 67–70.
3. Walley S.M. Shear Localization: A Historical Overview, Metallurgical and materials transactions A, 38A, (2007), pp. 2629–2654.
4. Buravova S.N. Self-healing effect of spall damage, Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki, 2017, vol. 87, no. 10. P. 1502–1509.
5. Buravova S. N., Petrov E. V., Saikova G. R., Alymov M. I. Physicochemical processes accompanying the localization of plastic deformation under pulsed loading. Doklady akademii nauk, 2018, Vol. 481. No. 6. P. 634–637.
6. Ovchinnikov V. V., Drits A. M. Technological features of friction stir welding of joints of aluminum alloys of the Al–Mg system // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2019. No. 3. P. 7–19.
7. Kumar R. Material flow visualization and determination of strain rate during friction stir welding / R. Kumar, V. Pancholi, R. P. Bharti // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. Vol. 255. P. 470–476.
8. Ren S.R. Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al–Mg–Si alloy / S.R. Ren, Z.Y. Ma, L.Q. Chen // Scripta Materialia. 2007. Vol. 56. P. 69–72.
9. Patent for invention RU No. 2828266 dated 20.12.2023. Method for producing composite materials from immiscible components based on friction stir welding technology / Ovchinnikov V.V., Shlyapin A.D., Kurbatova I.A. Lukyanenko E.V. Uchevatkina N.V. Yakutina S.V. Published: 10/08/2024 Bulletin. No. 28.
10. Ma Z.Y., Feng A.H., Chen D.L. & Shen J. (2017): Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, DOI: 10.1080/10408436.2017.1358145

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024; принята к публикации 21.12.2024.

The article was submitted 28.10.2024; approved after reviewing 08.11.2024; assepted for publication 21.12.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №1 (163). С.26-32.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №1 (163). P.26-32.

Научная статья

УДК 621.7-4

doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-26-32

Повышение эффективности измельчения угольной массы путём изменения геометрии ударной поверхности била

Сергей Владимирович Четвериков, к.т.н.

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, Чита, Россия

Serga652008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В молотковых мельницах разmol топлива осуществляется за счет удара бил о поступающие в мельницу куски угля, а также за счет истирающего действия бил по углю в пространстве между билами и корпусом мельницы. Недостатком молотковых мельниц является быстрый износ бил, требующий частой их замены. Известно, что чем больше масса изнашиваемого материала, тем дольше при прочих равных условиях может работать било. Увеличить массу изнашиваемого металла можно, увеличив массу самого била или степень использования металла. Как показывает практика, увеличение того и другого имеет свои пределы. Оптимальная масса била для мельниц средней производительности, имеющих диаметр до 1,6 м, равна 8...10 кг, для мельниц большой производительности, с диаметром ротора 2...2,5 м, оптимальная масса била равна 12...14 кг. Увеличение массы била сверх этих величин не приводит к существенному увеличению срока службы бил, так как при этом снижается степень использования металла. Кроме того, замена бил массой более 14 кг, значительно увеличивает трудоёмкость операций по смене бил. В работе исследована зависимость удельного износа бил от угла встречи с дробимым материалом и показана последовательность изменения формы рабочей поверхности бил. Рассмотрено истирание бил при разных углах атаки абразивных частиц угля, произведён расчёт скорости вылета частицы с рабочего органа, составлена математическая модель сил, возникающих в процессе рабочего движения бил. Разработана методика проектирования геометрической формы рабочего органа мельницы молотковой тангенциальной – била, позволяющая обеспечивать стабильный КПД мельницы за счёт равномерного износа ударной части била при сохранении её эффективной рабочей площади.

Ключевые слова: мельница молотковая тангенциальная, било, рабочая поверхность, угольная масса, дробление, измельчение, абразивный износ, угол атаки, кпд

Для цитирования: Четвериков С.В. Повышение эффективности измельчения угольной массы путём изменения геометрии ударной поверхности била // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 1 (163). С. 26–32. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-26-32

Increasing the efficiency of coal mass grinding by changing the geometry of the impact surface of the grinding wheel

Sergey V. Chetverikov, PhD Eng.

Zabaikalsky Institute of Railway Transport, Chita, Russia

Serga652008@yandex.ru

Abstract. In hammer mills, fuel is ground by the impact of the beaters on the coal pieces entering the mill, as well as by the abrasive action of the beaters on the coal in the space between the beaters and the mill body. A disadvantage of hammer mills is the rapid wear of the beaters, requiring their frequent replacement. It is known that the greater the mass of the material being worn, the longer the beater can work, all other things being equal. The mass of the metal being worn can be increased by increasing the

mass of the beater itself or the degree of metal utilization. As practice shows, increasing both has its limits. The optimal mass of the beater for medium-capacity mills with a diameter of up to 1,6 m is 8...10 kg, for high-capacity mills with a rotor diameter of 2...2,5 m, the optimal mass of the beater is 12...14 kg. Increasing the mass of the beater beyond these values does not lead to a significant increase in the service life of the beaters, since this reduces the degree of metal utilization. In addition, replacing beaters weighing more than 14 kg significantly increases the labor intensity of beater replacement operations. The paper investigates the dependence of specific beater wear on the angle of impact with the crushed material and shows the sequence of changes in the shape of the working surface of the beaters. The abrasion of the beaters at different angles of attack of abrasive coal particles is considered, the particle ejection velocity from the working element is calculated, and a mathematical model of the forces arising during the working movement of the beaters is compiled. A methodology for designing the geometric shape of the working element of a tangential hammer mill – a beater – has been developed, which allows for ensuring stable mill efficiency due to uniform wear of the striking part of the beater while maintaining its effective working area.

Keywords: tangential hammermill, grinding wheel, working surface, coal mass, crushing, grinding, abrasive wear, angle of trim, efficiency coefficient

For citation: Chetverikov S.V. Increasing the efficiency of coal mass grinding by changing the geometry of the impact surface of the grinding wheel / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 26–32. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-26-32

Введение

Технологический процесс измельчения применяется во многих отраслях народного хозяйства. Горнорудная промышленность, производство минеральных удобрений и добавок, строительная сфера ориентированы на приготовление измельчённой массы исходного материала.

Для энергетического комплекса процесс измельчения угля является ключевым звеном в подготовительной операции перед сжиганием. Детали молотковых дробилок, подвергающиеся воздействию угля как абразива, имеют износ как по массе металла, так и по форме рабочей поверхности. Одной из главных проблем измельчения угля является минимизация удельного износа бил и оптимизация затрат по их восстановлению.

Изменение формы рабочей поверхности бил в процессе износа

Процесс изнашивания бил зависит от многих параметров, таких, как величина и форма кромок отдельных частиц, их микротвёрдость, прочность связующей основы,

процентное содержание твёрдых частиц, превышающих микротвёрдость металла рабочего органа и т. д.

В практике сопротивление металла абразивному износу характеризуется относительной износостойкостью, которая определяется из соотношения:

$$i = \frac{g_{\text{эт}}}{g_i}, \quad (1)$$

где $g_{\text{эт}}$ – износ эталонного металла на каком-либо абразиве; g_i – износ исследуемого материала.

Анализ работ многих авторов показал, что износостойкость металлов изменяется в широких пределах в зависимости от свойств абразива, на котором она определяется [1 – 4].

Максимальные, минимальные и среднеарифметические значения относительной износостойкости бил из стали Г13Л и 40Г2, полученной на различных углях приведены в табл. 1.

1. Износостойкость бил из стали Г13Л и 40Г2 [5]

1. The wear resistance of steel grinding wheels G13L [5]

Металл	i_{max}	i_{min}	i_{cp}
Сталь 40Г2	1,66	1,27	1,45
Сталь Г13Л	2,69	1,64	2,10

Известно, что чем больше масса изнашиваемого материала, тем дольше при прочих равных условиях может работать било. Увеличить массу изнашиваемого металла можно, увеличив массу самого била или степень использования металла [5].

Как показывает практика, увеличение того и другого имеет свои пределы. Оптимальная масса била для мельниц средней производительности, имеющих диаметр до 1,6 м, равна 8...10 кг, для мельниц большой производительности с диаметром ротора 2...2,5 м оптимальная масса била равна 12...14 кг. Увеличение массы била сверх этих величин не приводит к существенному увеличению срока службы бил, т. к. при этом снижается степень использования металла. Кроме того, замена бил массой более 14 кг, значительно увеличивает трудоёмкость операций по смене бил.

Недостатки стандартных бил

Предельный износ била происходит в течение 300 ч работы мельницы при нормальной загрузке углём.

Износ била мельницы начинается со свободного края, показанный на рис. 1. Это связано с тем, что максимальную скорость имеет самая удалённая от центра вращения часть била. При этом эта часть била при работе испытывает самую большую нагрузку от измельчаемого материала.

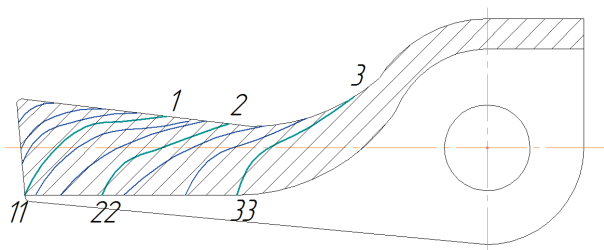


Рис. 1. Износ била при работе

Fig. 1. Wear of the beater during operation

При износе до зоны 1 – 11, било фактически сохраняет свою производительность. После зоны 1 – 11 начинается интенсивный абразивный износ. КПД мельницы начинает пропорционально уменьшаться относительно износу била в связи с тем, что: увеличивается

угол атаки частиц мелящего материала, который влияет на уменьшение силы удара размола; уменьшается рабочая площадь била, что приводит к уменьшению производительности; увеличивается «завал» мельницы, что вызывает нагрузку на электродвигатель и увеличение энергозатрат.

По истиранию била до зоны 2 – 22, составляющей 40...50 %, КПД падает до 60 %, а по истиранию до зоны 3 – 33 било становится неработоспособным.

В связи с тем, что уголь в мельницу поступает неравномерно и определёнными партиями, износ бил будет так же неравномерным и при техническом осмотре заменяются только те била, которые максимально изношены или сломаны, как показано на рис. 2.

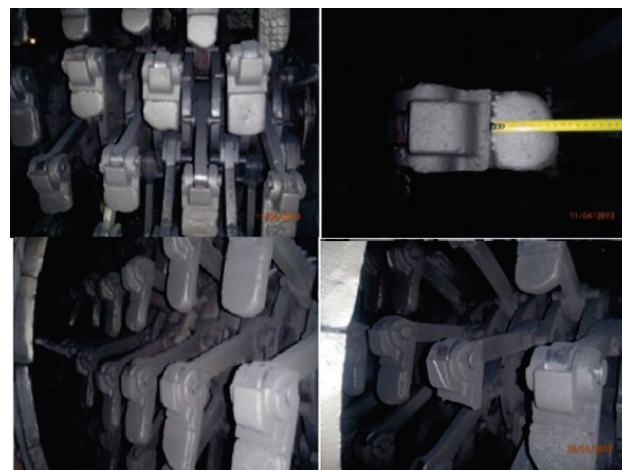


Рис. 2. Фотографии механизма ММТ и износа бил

Fig. 2. Photos of the MMT mechanism and grinding wheel wear

Самый большой износ бил происходит в мельницах на первом и последнем валу из-за того, что эти валы граничат со стенкой мельницы и поэтому там самая большая нагрузка на била.

Истирание бил при разных углах атаки абразивных частиц угля

Сила удара абразивных частиц значительно зависит от угла наклона рабочей поверхности, при этом эта зависимость влияет как на производительность мельницы, так и на время износа поверхности.

Анализ теоретических исследований по влиянию угла атаки на производительность мельницы и скорости изнашивания поверхности бил показывает довольно сложный характер взаимодействия абразивных частиц с поверхностью молотков. На эффективность процесса измельчения оказывает влияние не только угол встречи частиц с поверхностью, но и физико-механические свойства материала, с которым частица соударяется [6].

При царапании от прочности абразивной частицы зависит исход её взаимодействия с изнашивающимся материалом: будет материал разрушен при движении частицы или сначала она разрушится сама.

При ударном действии абразивная частица любой твёрдости может вызвать прямое разрушение материала, т. к. поверхностному слою при нормальном угле атаки передаётся вся кинетическая энергия удара. От прочности частицы зависит только размер контактной площадки, к которой прикладывается ударный импульс. При неизменном исходном размере абразивной частицы всегда можно подобрать такую скорость удара, что возникшие при полном дроблении частицы напряжения в материале не превысят его прочностные возможности [7].

Любое изменение рабочей зоны бил приведёт к изменению условий дробления угля, что приведёт к изменению коэффициента полезного действия мельницы [8]. Задача исследования состоит в том, чтобы изменить форму била для повышения его долговечности при наименьшей потере КПД мельницы.

Расчёт скорости вылета частицы

Рассмотрим процесс дробления угля и износ рабочей поверхности бил. Материал выбрасывается с ударного элемента на отбойники со скоростью v , представляющую собой геометрическую сумму двух скоростей: $v_r = v_{отн}$, $v_{r2} = v_{окр}$, где $v_{отн}$ — относительная скорость движения материала по поверхности ударного элемента; $v_{окр}$ — окружная скорость движения конца ударного элемента [9].

Скорость вылета частицы находится, как геометрическая сумма окружной и относительной скоростей:

$$v = \sqrt{v_{окр}^2 + v_r^2} + 2v_{окр} v_r \sin \phi, \quad (2)$$

где v_r — относительная скорость движения частицы; ϕ — угол между направлениями относительной и окружной скоростей.

Тогда угол вылета частицы с ударного элемента, повернутого относительно радиуса диска по ходу вращения, определяется из уравнения:

$$\sin \phi = \frac{v_r (\cos \phi)}{v}. \quad (3)$$

При движении частицы материала по ударному элементу увеличивается относительная скорость v_r , и, как следствие, повышается ускорение Кориолиса, которое представлено на рис. 3 в виде зависимости от положения частицы материала на плоском ударном элементе. Так же изменяется сила давления частицы на било и его износ.

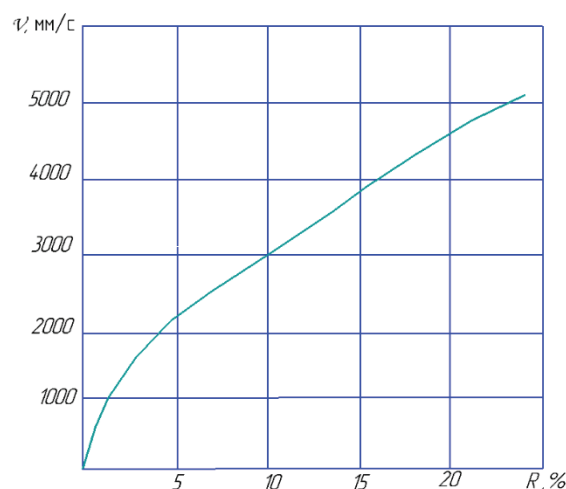


Рис. 3. Ускорение Кориолиса

Fig. 3. Coriolis acceleration

Следовательно, чем длиннее рабочая часть бил, тем больше скорость вылета материала на отбойники мельницы. Изменяя форму рабочей поверхности бил в сторону износа изменяется и процесс дробления. Для примера возьмём плоский и изогнутый ударный элемент, имитирующий износ, показанный на рис. 4.

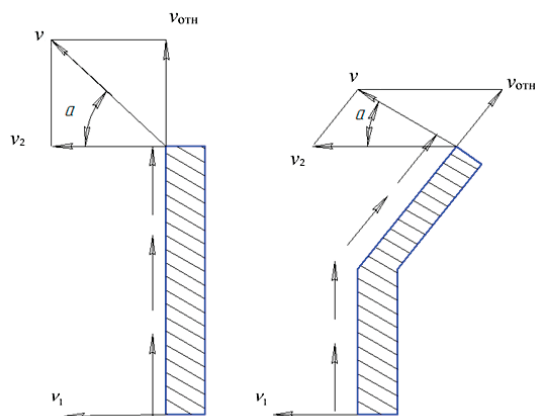


Рис. 4. Форма ударных элементов

Fig. 4. The shape of the impact elements

Представление о взаимосвязи износа ударного элемента и абсолютной скорости вылета материала представлено на рис. 4. Характерно снижение абсолютной скорости вылета материала и скорости ударного нагружения. Увеличение угла вылета частиц материала приводит к уменьшению пути движения материала от ударных элементов до отбойников.

При мелком и тонком измельчении скорость измельчаемого материала при сходе с плоского ударного элемента снижается. При фотографировании этого процесса с использованием стробоскопа наблюдается шлейф материала, отклоняющегося в сторону, противоположную движению ударных элементов.

Удельный износ, отнесённый к единице степени измельчения, для прямого и изогнутого элементов в процессе опыта практически не изменился и составил 0,268 и 0,269 г/г, а удельный расход электроэнергии, приходящейся на единицу степени измельчения, соответственно составил 1,61 и 2,47 кДж/кг.

Для сохранения стабильных характеристик дробления необходимо изменение поверхности ударных элементов по направлению вращения ротора. Это изменение позволит увеличить ресурс ударного элемента и удлинить время межремонтного цикла в период эксплуатации измельчителя.

Математическая модель сил, возникающих в процессе рабочего движения бил

После рассмотрения факторов, влияющих на износ и производительность мельницы молотковой тангенциальной, предлагаемая

модель била, представленная на рис. 5, получила изменение рабочей поверхности путём закругления края била в сторону, противоположную его полёту, а для предотвращения раскола и разлома детали было изменено ребро жёсткости.

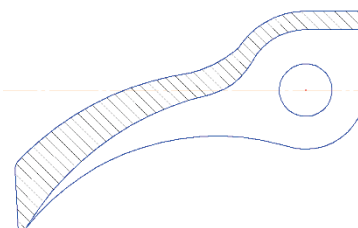


Рис. 5. Изменённая форма била

Fig. 5. The modified grinding wheel shape

При взаимодействии частицы угля с рабочей поверхностью била происходит удар – это действие силы, достигающей по модулю очень больших значений в течение весьма малого промежутка времени.

Для анализа удара частицы угля о рабочую поверхность била рассмотрен абсолютно неупругий удар. Удар – это импульс мгновенной силы, который зависит от массы тел и их скорости движения:

$$N = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2 \cdot \sin \alpha), \quad (4)$$

где N – импульс мгновенной силы; m_1 – масса била; m_2 – масса частицы угля; α – угол падения угля на било; v_1 – скорость движения била; v_2 – скорость движения частицы угля.

Так как частицы угля совершают свободное падение на поверхность била, то их скорость определяется по формуле:

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad (5)$$

а скорость движения била определяется по формуле угловой скорости:

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения; h – высота падения угля; D – диаметр точки

соударения угля о било; n – число оборотов мельницы в мин.

Подставив скорости тел v_1 и v_2 в формулу импульса мгновенной силы, получим:

$$N = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} - \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha} \right); \quad (7)$$

$$N = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} - \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha}. \quad (8)$$

При $N = \text{const}$, получим:

$$\frac{D}{\sin \alpha} = \frac{1000 \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{\pi \cdot n}; \quad (9)$$

$$\sin \alpha = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}. \quad (10)$$

Результат вычислений показывает, что $\sin \alpha$ изменяется только при изменении диаметра точки соударения частицы угля о било. Разделив рабочую поверхность била на четыре участка, показанных на рис. 6, и приняв высоту падения частицы угля $h = 1$ м, число вращения ротора ММТ $n = 750$ об/мин получим, что при:

$$R = 630 \text{ мм } \sin \alpha = 0,976, \quad \alpha = 98^\circ;$$

$$R = 670 \text{ мм } \sin \alpha = 0,927, \quad \alpha = 112^\circ;$$

$$R = 710 \text{ мм } \sin \alpha = 0,819, \quad \alpha = 125^\circ;$$

$$R = 750 \text{ мм } \sin \alpha = 0,669, \quad \alpha = 138^\circ.$$

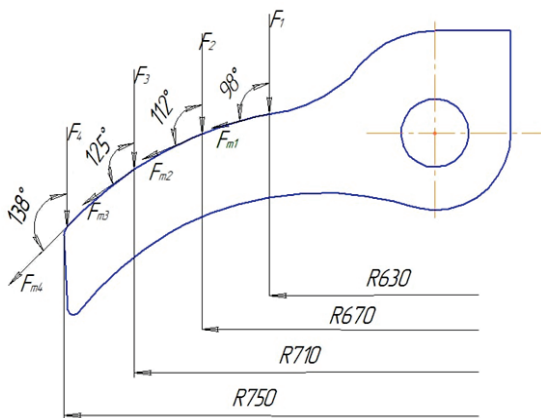


Рис. 6. Определение угла наклона разработанного била от радиуса

Fig. 6. Determination of the angle of inclination of the developed grinding wheel depending on radius

Изменённая форма била позволяет уравновесить ударные нагрузки на всей рабочей поверхности детали. Износ такого била будет более равномерен, чем у стандартного. Предполагаемые зоны износа била представлены на рис. 7.

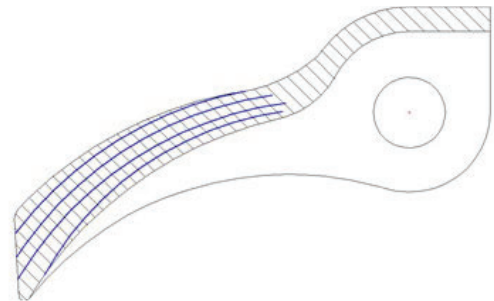


Рис. 7. Предполагаемые зоны износа разработанного била

Fig. 7. Potential wear zones of the developed grinding wheel

Использование такого била имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартными билами.

Изменённый угол плоскости била снижает начальный коэффициент полезного действия мельницы. Но так как износ бил равномерен, то КПД не изменяется на всём промежутке времени работы. Сравнение со стандартным билем представлено на рис. 8, из которого видно, что полный КПД разработанного била выше, чем стандартного, как следствие, более стабильна работа всей мельницы, постоянная производительность на выходе, отсутствие «завала» мельницы, снижение расхода электроэнергии на размол угля.

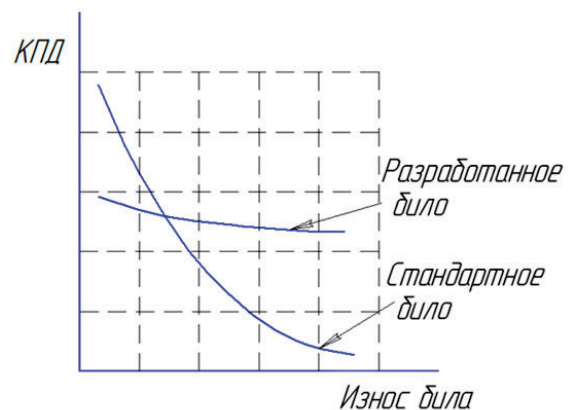


Рис. 8. Зависимость КПД от износа двух видов бил

Fig. 8. Dependence of efficiency on wear of two types of beaters

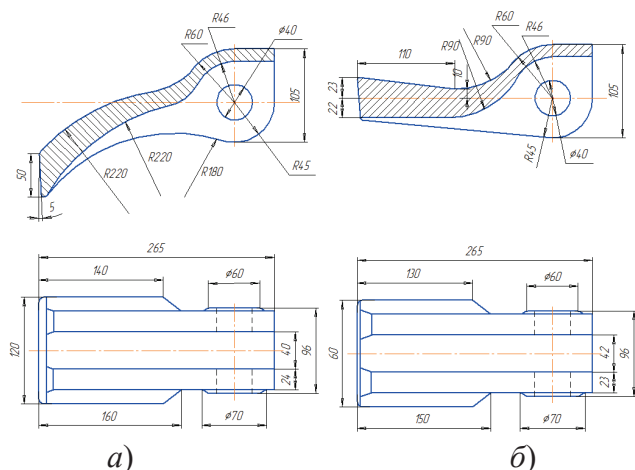


Рис. 9. Разработанное (а) и стандартное (б) било

Fig. 9. Developed (a) and standard (b) beater

Выводы

Разработанное било имеет равномерный износ по всей рабочей поверхности, обеспечивается постоянный КПД мельницы за счёт равномерного износа ударной части, появляется возможность использования специальных накладок на рабочую поверхность, а также формирования слоёв металла на рабочей поверхности, полученных наплавкой и имеющих специальные физико-механические свойства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тепляшин М.В. Разработка методики определения износостойкости бил углеразомольных молотковых мельниц // Вестник Северо-Восточного государственного университета. 2016. № 25. С. 103–106.
2. Акимов В.В., Громовик А.И., Грязнов А.Ю. Снижение абразивного износа элементов мельниц ударно-интегрального действия с применением твердых безвольфрамовых сплавов tic-tini // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 2 (54). С. 48–52.
3. Тетерин В.С., Новиков Н.Н., Гайбарян М.А., Костенко М.Ю. Теоретическое обоснование параметров и режимов работы измельчителя бурого угля // Наука в центральной России. 2019. № 3 (39). С. 60–67.
4. Юров В.М., Гученко С.А., Маханов К.М. Нанесение и исследование эксплуатационных характеристик упрочняющих высокоэнтروпийных покрытий на билы углеразомольных мельниц // Sciences of Europe. 2020. № 47-1 (47). С. 17–26.
5. Братковский Е.В., Шаповалов А.Н., Дема Р.Р. Повышение ударно-абразивной стойкости сталей // Вестник машиностроения. 2019. № 3. С. 64–67.

6. Балданов М.Б., Сергеев Ю.А., Лабаров Д.Б., Гармаев Ц.И. Энергетическая оценка процесса измельчения кусковых материалов // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 2 (73). С. 57–63.

7. Аэродинамика движения частиц измельчаемого материала в рабочей камере мельницы: сб. науч. тр. / БГТУ, Институт физики; под ред. А.А. Гарабажуи. Белгород, 1999. 78 с.

8. Власенко Д.А., Павлиненко О.И., Левченко Э.П. Энергозатраты ударных дробилок с жестким и шарнирным креплением бил к ротору // Вестник Донецкого национального технического университета. 2016. № 3 (3). С. 21–26.

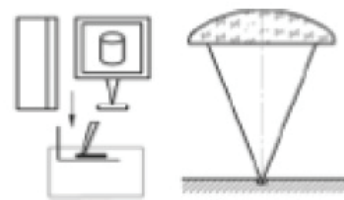
9. Боброва Н.В. Влияние износа ударных элементов дробилок на их рабочие характеристики // Международная научная конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса» Иваново, 2007. С. 124–125.

REFERENCES

1. Teplyashin M.V. Development of a methodology for determining the wear resistance of coal grinding hammer mill beaters // Bulletin of the North-Eastern State University. 2016. No. 25. P. 103–106.
2. Akimov V.V., Gromovik A.I., Gryaznov A.Yu. Reducing the abrasive wear of impact-integral mill elements using tic-tini hard tungsten-free alloys // Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University. 2017. No. 2 (54). P. 48–52.
3. Teterin V.S., Novikov N.N., Gaibaryan M.A., Kostenko M.Yu. Theoretical justification for the parameters and operating modes of a brown coal grinder // Science in Central Russia. 2019. No. 3 (39). P. 60–67.
4. Yurov V.M., Guchenko S.A., Makhanov K.M. Application and study of operational characteristics of hardening high-entropy coatings on coal mill beaters // Sciences of Europe. 2020. No. 47-1 (47). P. 17–26.
5. Bratkovsky E.V., Shapovalov A.N., Dema R.R. Increasing the impact-abrasive resistance of steels // Bulletin of Mechanical Engineering. 2019. No. 3. P. 64–67.
6. Baldanov M.B., Sergeev Yu.A., Labarov D.B., Garmaev Ts.I. Energy assessment of the process of grinding lump materials // Bulletin of VSGUTU. 2019. No. 2 (73). P. 57–63.
7. Aerodynamics of particle motion in the mill working chamber: Coll. sci. tr. / BSTU, Institute of Physics; edited by A.A. Garabajui. Belgorod, 1999. 78 p.
8. Vlasenko D.A., Pavlinenko O.I., Levchenko E.P. Energy consumption of impact crushers with rigid and hinged attachment of beaters to the rotor // Bulletin of Donetsk National Technical University. 2016. No. 3 (3). P. 21–26.
9. Bobrova N.V. The influence of wear of impact elements of crushers on their performance characteristics // International scientific conference “Current problems and prospects for the development of the agro-industrial complex” Ivanovo, 2007. P. 124–125.

Статья поступила в редакцию 14.08.2024; одобрена после рецензирования 06.09.2024; принята к публикации 16.09.2024.

The article was submitted 14.08.2024; approved after reviewing 06.09.2024; assepted for publication 16.09.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №1 (163). С.33-37.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №1 (163). P.33-37.

Научная статья
УДК 621.9.06
doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-33-37

Технологичность конструкций изделий, получаемых методом аддитивных технологий

Евгения Андреевна Курсевич¹, аспирант
Юрий Сергеевич Абраменко², к.т.н.

^{1,2} ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Россия

¹ ingénue@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² vniitf@vniitf.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрены методы оценки технологичности конструктивного исполнения изделий при использовании аддитивных технологий. Произведен анализ изученности понятия технологичности и применимости существующих разработок для аддитивного производства. Рассмотрены качественный и количественный подходы к оценке технологичности. Качественный подход основан на опыте и рекомендациях, но требует адаптации под специфику аддитивных технологий. Количественный подход через определение коэффициентов технологичности представляется более предпочтительным, т. к. позволяет управлять производственным процессом и быстро адаптироваться к изменениям. Проанализированы различные методики количественной оценки технологичности, разработанные отечественными и зарубежными авторами. Сделан вывод, что универсальные методы требуют дополнительной адаптации под специфические характеристики и возможности аддитивного производства, такие как создание сложных геометрических структур, оптимизация по весу и материалоемкости. Подчеркнута необходимость комплексного междисциплинарного подхода к разработке методологии оценки технологичности, учитывающей экономические, экологические и технические факторы аддитивных технологий. Это позволит повысить эффективность производства, снизить затраты и риски при запуске новой продукции.

Ключевые слова: технологичность конструкции изделия, коэффициенты технологичности, аддитивные технологии

Для цитирования: Курсевич Е.А., Абраменко Ю.С. Технологичность конструкций изделий, получаемых методом аддитивных технологий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 1 (163). С. 33–37. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-33-37

Workability of industrial products obtained by fully additive technologies

Evgenia A. Kursevich¹, PhD student

Yuri S. Abramenko², PhD Eng.

^{1,2} FSUE «RFNC-All-Russian Research Institute of applied physics named after Academician E.I. Zababakhin»,
Snezhinsk, Russia

¹ ingénue@yandex.ru

² vniitf@vniitf.ru

Abstract. *Methods for evaluating workability of industrial products obtained by fully additive technologies are viewed. The study of the concept of workability and applicability of existing developments for additive manufacturing is being analyzed. Qualitative approach and quantitative aspect are used simultaneously for evaluating the workability. The qualitative aspect is based on experience and recommendations, but requires adaptation to the specifics of additive technologies. A quantitative approach through the determination of workability coefficients is preferable, as it allows managing of the production process and is quickly adaptable to changes. Various quantitative evaluation techniques of workability, developed by domestic and foreign authors, have been analyzed. It is concluded that flexible ways require additional adaptation to the specific characteristics and capabilities of additive manufacturing, such as the creation of complex geometric structures, optimization in terms of weight and material consumption. The need for a comprehensive multidisciplinary approach to the development of a workability evaluation concept, taking into account the economic, environmental and technical factors of additive technologies, is emphasized. This will increase production efficiency, reduce costs and risks when launching new products.*

Keywords: workability of industrial product, workability coefficients, additive technologies

For citation: Kursevich E.A., Abramenko Yu.S. Workability of industrial products obtained by fully additive technologies / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 33–37. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-33-37

Введение

В современной производственной сфере наблюдается активное распространение аддитивных технологий и т. к. это направление уже давно переросло нишу прототипирования и стало полноценным средством производства, возникает вопрос о целесообразном применении аддитивные технологии для изготовления изделий. Для рационального применения таких технологий появилась необходимость в разработке научно-обоснованных критериев и методов оценки технологичности конструкции изделий применительно именно для этих технологий. Основной акцент в данной задаче делается на определении степени соответствия конструкции разрабатываемых изделий специфическим требованиям и возможностям аддитивного производства, что представляет собой важнейшую научную и практическую задачу.

Технологичность конструкции изделия – это совокупность свойств конструкции, которые определяют ее приспособленность к достижению оптимальных затрат ресурсов при производстве:

- возможность изготовления конструкции с наименьшими трудовыми и материальными затратами;
- возможность применения рациональных технологических процессов, средств технологического оснащения и автоматизации;
- обеспечение заданных показателей качества и эксплуатационных характеристик при оптимальных затратах;
- простоту технологической подготовки производства, технического обслуживания,

ремонта и утилизации изделия [1].

Таким образом, и технологичность конструкции при применении аддитивного производства характеризует, насколько целесообразно и эффективно можно изготавливать данную конструкцию изделия с использованием аддитивных технологий.

Исследование

Рассмотрим изученность понятия технологичности изделия в общем, применимость и потенциальную адаптацию разработок для аддитивных технологий. Рассмотрим возможности применения качественного и количественного метода оценки технологичности изделия и применения аддитивных технологий для изготовления.

Качественная оценка технологичности конструкций изделия, базирующаяся на опыте и рекомендательных материалах, и играет ключевую роль в традиционных методах производства [3, 9]. Однако, применяя этот подход к аддитивным технологиям, возникает необходимость доработки и развития новых критериев и подходов к данной оценке.

Качественная оценка может помочь при оптимизации конструкций под конкретные виды аддитивных технологий, при этом предоставляя рекомендации по дальнейшему усовершенствованию производственных процессов. Есть ряд работ зарубежных авторов, например, Y. Meng, M. Guvendiren [4, 5], в которых подтверждается необходимость тщательной технологической подготовки производства с применением аддитивных технологий, а именно, проведение качественного анализа технологичности

изделия и от результатов этого анализа зависит эффективность использования таких технологий. Тем не менее, качественная оценка технологичности конструкции изделия, не формализована даже в традиционном производстве и тем более далека от формализации в аддитивных технологиях и полностью зависит от опыта специалиста. В связи с этим, предпочтительнее использовать второй метод – метод количественной оценки технологичности конструкции изделия.

Использование второго метода оценки уровня технологичности изделий, количественного метода – основывается на определении технологического коэффициента изделия и может быть осуществлена двумя основными подходами, которые учитывают различные аспекты планирования и условия производства. Рассмотрим каждый из подходов подробнее, применительно к аддитивным технологиям.

Первый подход оценки технологичности конструкции изделия по основным показателям, влияющими на эффективность его изготовления. При использовании аддитивных технологий, данный подход мог бы включать этапы определения уровня технологичности конструкции нового изделия, сопоставляя его с предварительно заданными уровнями технологичности конструкции изделия на основе критериев, как трудоёмкость и себестоимость производства, но при аддитивных технологиях возникают сложности с прогнозированием. Это связано с тем, что в аддитивном производстве сложно точно определить трудоёмкость изготовления и его себестоимость до начала фактического производства из-за изменчивости технологических параметров, загруженности оборудования, сложности настройки оборудования, выбора материалов.

Данный подход часто связан с риском неопределённости и может вести к задержкам в процессе запуска производства изделий, т. е. затраты времени на технологическую подготовку производства могут быть значительными.

Второй подход с использованием коэффициентов технологичности (второй подход) можно применять следующим образом:

Оценка технологичности конструкции изделия через коэффициенты технологичности, т. е. в начале производства разрабатывается система показателей технологичности, которая может включать такие параметры, как лёгкость достижения

требуемых характеристик, возможности минимизации расходов, удобство последующей обработки, время наладки и переналадки оборудования.

Каждое изделие можно оценить по достигнутым уровням этих коэффициентов, сравнивая их с заданными целевыми показателями и оперативно корректировать конструкцию изделия для повышения технологичности.

Этот метод позволяет управлять процессом производства, уменьшая риски длительной технологической подготовки и неопределённости производственных параметров. Коэффициенты технологичности помогают выявлять ключевые аспекты производства, которые требуются для оптимизации, что в конечном итоге может снизить трудоёмкость и улучшить экономическую эффективность проектов аддитивных технологий.

Оценивая оба подхода в контексте аддитивных технологий, второй подход часто оказывается предпочтительнее благодаря его гибкости, точности в оценках и способности быстро адаптироваться к изменениям в процессах, что критически важно для инновационных производственных технологий.

Оценке технологичности конструкции изделия количественным методом посвящено много работ, рассмотрим самые основные и новые из них и их применимость к аддитивным технологиям.

Методы, разработанные Государственным комитетом стандартов и представленные в работах ученых, таких как В.Н. Корытов, В.Ю. Угринов и др., предлагают различные классификации и формулы для оценки ключевых показателей технологичности. Особое внимание у авторов Б.С. Балабанова и В.Б. Гокуна, уделяется анализу материалоёмкости как центрального критерия, определяющего экономичность использования ресурсов при создании изделия. Тем не менее, эти критерии не способны обеспечить исчерпывающую оценку технологичности в условиях применения аддитивного производства.

Аддитивные технологии по своей природе влияют на такие аспекты, как сложность воспроизводимых форм и возможность создания оптимизированных по весу конструкций с уникальными свойствами, что выходит за рамки традиционной материалоёмкости. Труды учёных И.А. Леонтьева, И.Е. Андрейчука,

А.С. Давыдовского и их коллег, вносят значительный вклад в развитие определения затрат трудовых ресурсов от площади поверхности изделия как ключевого показателя её технологической проработанности. Этот критерий приобретает особую актуальность в области аддитивных технологий, где сложность поверхности изделия обычно и является ключевым фактором выбора метода изготовления, но не определяет однозначность оценки технологичности применительно к аддитивным технологиям.

Автор Д.Ю. Амиров и его коллеги, разработали систему показателей для количественной оценки, рассчитанную на широкий спектр производственных условий, включая те, что определяются ГОСТ 14.201.

Данная система показателей могла бы быть адаптирована под уникальные особенности и потребности аддитивного производства, но эти коэффициенты ориентированы на традиционные методы производства и не отражают особенности аддитивных технологий. Их применение в производственной сфере требует переосмысления подходов к определению технологичности и трудоёмкости изготовления продукции.

Работы авторов Вартанов М.В., Безъязычный В.Ф. и др., в т. ч. и зарубежные методики Hitachi AEM, Lucas DFA и DFMA, призваны определять и оптимизировать изготовление изделий, учитывая различные коэффициенты технологичности. Эти подходы могли бы быть адаптированы к аддитивным технологиям при определенных условиях.

Требования к технологичности деталей при применении аддитивных технологий значительно отличаются от аналогичных требований к деталям, изготавливаемых механической обработкой, поэтому универсальные методологии оценки технологичности потребуют дополнительной адаптации и доработки для учёта специфических характеристик и потенциала аддитивного производства. Это включает возможность создания сложных геометрических структур без значительного увеличения стоимости, оптимизацию конструкций для снижения веса и материалоёмкости, а также специальные требования к качеству и точности изготовления [2, 8]. Таким образом, комплексная оценка, адаптированная под аддитивные методы, будет способствовать более эффективному и экономичному проектированию и производству изделий.

Анализ подходов к оценке технологичности конструкции изделий выявляет необходимость интеграции знаний о специфике аддитивных технологий на всех этапах проектного и производственного процесса. В этой сфере научные исследования и практические разработки должны сосредоточиться на создании методологии, позволяющей систематически оценивать и улучшать конструкции изделий с точки зрения их производственной эффективности при использовании аддитивных технологий. Речь идёт о необходимости создания универсальных критериев, которые бы отвечали новым требованиям и возможностям аддитивного производства.

Решение этой задачи требует междисциплинарного подхода, включающего в себя технологию машиностроения, материаловедения, компьютерного моделирования, а также глубокого анализа и оптимизации процессов аддитивных технологий. Только всесторонним подходом можно будет достигнуть успеха в повышении технологичности изделий при использовании аддитивных технологий, что в итоге приведёт к снижению затрат, увеличению скорости производства и повышению качества конечного изделия.

Выводы

Анализ представленных исследований и методик показывает, что оценка технологичности конструкций при использовании аддитивных технологий требует комплексного подхода и адаптации существующих методик. Основные выводы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Введение количественных коэффициентов, оценивающих технологичность изделий в рамках аддитивных технологий, позволяет формализовать процесс оценки и делает его более объективным и эффективным. Это особенно важно в условиях, где опыт и интуитивные знания могут быть недостаточными для точной оценки;

2. Методы оценки должны быть гибкими и позволять оперативно вносить изменения в проект или процесс производства, что критически важно для аддитивных технологий, где условия производства могут быстро изменяться;

Итак, интеграция количественных методов и их адаптация под условия аддитивных технологий открывает

возможности для улучшения производственных процессов, повышения эффективности и снижения рисков, связанных с запуском нового производства. Совершенствование данных методов поможет обеспечить устойчивое развитие и инновации в сфере производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **ГОСТ 14.205-83.** Технологичность конструкции изделий [Текст]. Введ. 1983-04-01. М.: Издательство стандартов, 1983. 11 с.
2. **Аддитивные технологии в машиностроении:** учебное пособие / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. Санкт-Петербург, 2013. 222 с.
3. **Базров Б.М., Троицкий А.А.** Анализ метода оценки технологичности конструкции изделия как предмета производства // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № 4 (241). С. 39–43.
4. **Meng, Y., Zhang Y.** Design for additive manufacturing: A review of case studies // Assembly Automation. 2014. Vol. 34, no. 4. P. 274–283. doi: 10.1108/AA-04-2014-047.
5. **Guvendiren M., Molde J., Soares R.M.D., Kunkel E., Smith B., Padilla P.** Impact of design and process parameters on mechanical properties of 3D printed parts // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 38. 101804.
6. **Технологичность** конструкции изделий машиностроения: учебное пособие / А.П. Бабичев, В.И. Безжон, М.Е. Попов, А.М. Попов, А.Г. Хведелидзе, Н.О. Шевченко. Ростов-на-Дону, 2014. 124 с.
7. **Государственная программа «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности»** [Электронный ресурс] / Правительство РФ: офиц. сайт. - URL: <http://government.ru/rugovclassifier/862/events/> (дата обращения: 14.09.2023).
8. **Материалы** и процессы аддитивных технологий (быстрое прототипирование) / В.А. Дьяченко, И.Б. Челпанов, С.О. Никифоров, Д.Д. Хозонконова. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2015. 198 с.
9. **Оценка** количественных показателей производственной технологичности деталей / П.Ю. Бочкарев, Л.Г. Бокова. Саратов: Саратовский гос. технический ун-т, 2015. 110 с.
10. **Скворцова Д.А.** Разработка дополнительных

коэффициентов для оценки технологичности серийной сборки наукоемких многокомпонентных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 6. С. 3–7.

REFERENCES

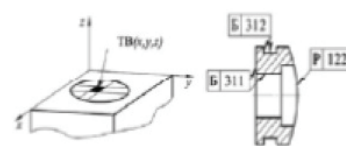
1. GOST 14.205-83. Manufacturability of product design [Text]. Introduced 1983-04-01. Moscow: Publishing House of Standards, 1983. 11 p.
2. Additive technologies in mechanical engineering: a tutorial / M.A. Zlenko, A.A. Popovich, I.N. Mutylina. St. Petersburg, 2013. 222 p.
3. Bazrov B.M., Troitsky A.A. Analysis of the method for assessing the manufacturability of a product design as an item of production // Handbook. Engineering journal with an appendix. 2017. No. 4 (241). P. 39–43.
4. Meng, Y., Zhang Y. Design for additive manufacturing: A review of case studies // Assembly Automation. 2014. Vol. 34, no. 4. P. 274–283. doi: 10.1108/AA-04-2014-047.
5. Guvendiren M., Molde J., Soares R.M.D., Kunkel E., Smith B., Padilla P. Impact of design and process parameters on mechanical properties of 3D printed parts // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 38. 101804.
6. Manufacturability of mechanical engineering products design: a tutorial / A.P. Babichev, V.I. Rostov-on-Don, 2014. 124 p.
7. State program «Development of industry and increasing its competitiveness» [Electronic resource] / Government of the Russian Federation: official. website. - URL: <http://government.ru/rugovclassifier/862/events/> (date accessed: 14.09.2023).
8. Materials and processes of additive technologies (rapid prototyping) / V.A. Dyachenko, I.B. Chelpanov, S.O. Nikiforov, D.D. Khozonkhonova. Ulan-Ude: Publishing house of the BSC SB RAS, 2015. 198 p.
9. Evaluation of quantitative indicators of production manufacturability of parts / P.Yu. Bochkarev, L.G. Bokova. Saratov: Saratov State Technical University, 2015. 110 p.
10. Skvortsova D.A. Development of additional coefficients for assessing the manufacturability of serial assembly of high-tech multicomponent products // Assembly in mechanical engineering, instrument making. 2015. No. 6. P. 3–7.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.07.2024; одобрена после рецензирования 16.08.2024; принята к публикации 31.10.2024.

The article was submitted 17.07.2024; approved after reviewing 16.08.2024; assepted for publication 13.10.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №1 (163). С.38-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2021. №1 (163). P.38-48.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-38-48

Метод отображения технологических возможностей механообрабатывающего оборудования атрибутами теории графов

Бочкарев Петр Юрьевич^{1, 2}, Д.Т.Н.

¹ Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Камышин, Россия

² Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии инженерии имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия

bpy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

Аннотация. Представлен методический подход информационного обеспечения технологической подготовки систем механообработки, направленный на создания интеллектуальных систем автоматизированного проектирования и реализации технологических процессов с учетом реальной производственной ситуации. Внедрение автоматизированного проектирования технологических процессов сдерживается из-за отсутствия доступных научно-методических принципов и практических методик проектирования банков данных, отвечающих основным требованиям к обеспечению необходимого качества обработки информации и ориентации на потребности в решении задач в реальных производственных условиях. Основной причиной этого является недостаток исходной информации, которую можно в формализованном виде получить из конструкторской и технологической документации без дополнительного участия инженера. Включая данные по обрабатываемым станкам и средствам технологической оснастки, позволяющим на основе сопоставления имеющихся реальных технологических возможностей каждой единицы оборудования и характеристик деталей (заготовок) выполнять необходимые проектные процедуры по разработке технологических процессов. Разработана структура взаимосвязей между отдельными параметрами и характеристиками поверхностей обрабатываемой детали и средствами технологического оснащения, последовательность формализованного описания представленной схемы с использованием в качестве математического аппарата теории графов. Спроектированы элементы связей, описывающие: влияние используемого технологического способа на изменение показателей качества обрабатываемой поверхности в рамках отдельного технологического перехода; предельные размеры, качественные характеристики используемых в качестве базовых поверхностей и требования к их взаимному пространственному расположению для варианта выбранной технологической оснастки в системе координат оборудования; диапазоны рабочей зоны обработки, учитывающей совокупность параметров обрабатываемой и базовых поверхностей детали с элементами технологической оснастки. Результатом создания графа, на основе которого формируется база данных в реляционной форме, является четко структурированное информационное обеспечение для выполнения комплекса проектных процедур, ориентированное на анализ установочных и операционных размерных связей. Развитие методической базы информационного обеспечения создания систем автоматизированной технологической подготовки производств, обеспечивает учет, как реального состояния действующих систем, так и сложившуюся современную ситуацию в области управления разработкой технологических процессов.

Ключевые слова: машиностроительное производство, технологическая подготовка механообрабатывающего производства, установочные размерные связи, базы данных, системы автоматизированного проектирования

Для цитирования: Бочкарев П.Ю. Метод отображения технологических возможностей механообрабатывающего оборудования атрибутами теории графов // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 1 (163). С. 38–48. doi:10.30987/2223-4608-2025-1-38-48

A rendering method of technology options for machining equipment through graph theory attributes

Peter Yu. Bochkarev^{1, 2} D. Eng.

¹ Kamyshinsky Institute of Technology (branch) Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia

² Saratov State University of Genetics, Biotechnology of Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia
bpy@mail.ru

Abstract. A technical approach to information support for the machine work process design is presented, which is aimed at creating intelligent computer-aided design systems and implementing technological processes, taking into account the real production situation. The introduction of computer-aided design of manufacturing activity is slowed down due to the lack of available scientific and methodological principles and practical methods for designing databases that meet the basic requirements for ensuring the necessary quality of information processing and focusing on the needs for solving problems in real production conditions. The main reason for this is the lack of initial information, which can be formalized from design and technological documentation without the involvement of an engineer. Including data on processing machines and technological equipment, which makes it possible, based on a comparison of the available real technological capabilities of each piece of equipment and the characteristics of parts (workpieces), to carry out the necessary design procedures for the development of manufacturing activities. The structure of the interrelationships between the individual parameters and characteristics of the surfaces of the machined part and the means of technological equipment, the sequence of the formalized description of the presented scheme using graph theory as a mathematical tool technique, is developed. The elements of connections are designed that describe: the influence of the process used for the quality indicators change in case of the treated surface within the framework of a separate technological transition; the maximum dimensions, the qualitative characteristics of the base surfaces used and the requirements for their relative spatial arrangement for the equipping variant of the selected technological equipment in the coordinate system of the equipment; the ranges of the working area of processing, taking into account the set of parameters of the bases and operating surfaces of the part with the elements of the technological equipment. The result of the graphing, on the basis of which a relational database is formed, is a clearly structured information support for the implementation of a set of design procedures, focused on the analysis of definitive and operational dimensional relationships. The development of a procedural framework of the information support base for the creation of automated technological preparation systems ensures both: real state of existing systems and the current situation in the field of process development management, are taken into account.

Keywords: mechanical facilities, process design of machining production, definitive dimensional relationships, databases, computer-aided design systems.

For citation: Bochkarev P.Yu. A rendering method of technology options for machining equipment through graph theory attributes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 1 (163). P. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-1-38-48

Введение

Развитие информационного обеспечения технологической подготовки комплексов механообработки в настоящее время становится одним из определяющих направлений научно-

исследовательских работ, без которых невозможно создания интеллектуальных систем автоматизированного проектирования и реализации технологических процессов с учетом реальной производственной ситуации. В связи с объективным фактором специфических

особенностей каждого конкретного производства, обусловленного номенклатурой и программой выпускаемой продукции, составом и состоянием оборудования, технологической оснастки, профессиональным уровнем кадров и организацией технологической подготовки производства, сложившуюся ситуацию в организации данных в целом можно охарактеризовать как недостаточно отражающую современным запросам общества [1 – 6]. Даже при использовании известных систем автоматизированного проектирования для выполнения отдельных технологических проектных процедур пользователи насыщают информационные базы на основе своих субъективных знаний и опыта. Это приводит зачастую к недостоверности, избыточности, противоречивости данных, что сказывается на качестве технологической подготовки и управлении реализацией производственных процессов.

Внедрение в вопросах проектирования технологических процессов информационной технологии сдерживается из-за отсутствия доступных научно-методических принципов и практических методик проектирования баз данных, отвечающих основным требованиям к обеспечению необходимого качества обработки информации и ориентации на потребности решения задач в реальных производственных условиях.

Материалы и методы

Процесс создания технологии основан на анализе исходных данных и данных, получаемых в ходе реализации технологии, которые являются основой для выработки управляющих решений. Известные в настоящее время исследования в данном направлении в решении приведенных вопросов связаны с двумя аспектами:

– формирования на основе статистического анализа структурных таблиц точности обработки, содержащих значения величин и оценки достоверности изменения технологических допусков в ходе многостадийной механической обработки, адаптированных под технологические возможности и технологические традиции конкретного механообрабатывающего производства для оптимального проектирования маршрутных технологий

механической обработки поверхностей заданного качества [7– 9];

– обоснования структуры базы данных с локализацией информационных объектов, характеризующих отдельные проектные процедуры создания и реализации технологии, с формализованным описанием перечня информационных объектов и возможных взаимосвязей между ними [10 – 12].

Выполненные исследования позволили частично систематизировать подходы к информационному обеспечению технологической подготовки механообрабатывающих производств, однако не создали условий для разработки унифицированных методов сбора и обработки данных с последующим автоматическим заполнением и корректировкой баз, однотипных для различных производств. Одной из причин этого является недостаток исходной информации, которую можно в формализованном виде получить из конструкторской и технологической документации без дополнительного участия инженера. В статье [13] приведена методика формирования в виде графов с последующим созданием математической модели описания детали (заготовки), включающей всю информационную составляющую по данному объекту для выполнения проектирования технологического процесса.

Необходимость в таком же полном описании очевидна для обрабатывающих станков и средств технологической оснастки, позволяющих на основе сопоставления имеющихся реальных технологических возможностей каждой единицы оборудования и характеристик деталей (заготовок) выполнять необходимые проектные процедуры по разработке технологических процессов. Такое описание значительно сложнее и требует установления взаимосвязей между отдельными параметрами и характеристиками обрабатываемой детали и средств технологического оснащения, поэтому первоначально (рис. 1) представлено описание структурной схемы этих взаимосвязей. Построение схемы выполнялось с учетом требований обеспечения полноты необходимой информации применительно к системе планирования многономенклатурных технологических процессов как на стадиях разработки маршрутной [14], так и операционной технологии [15].

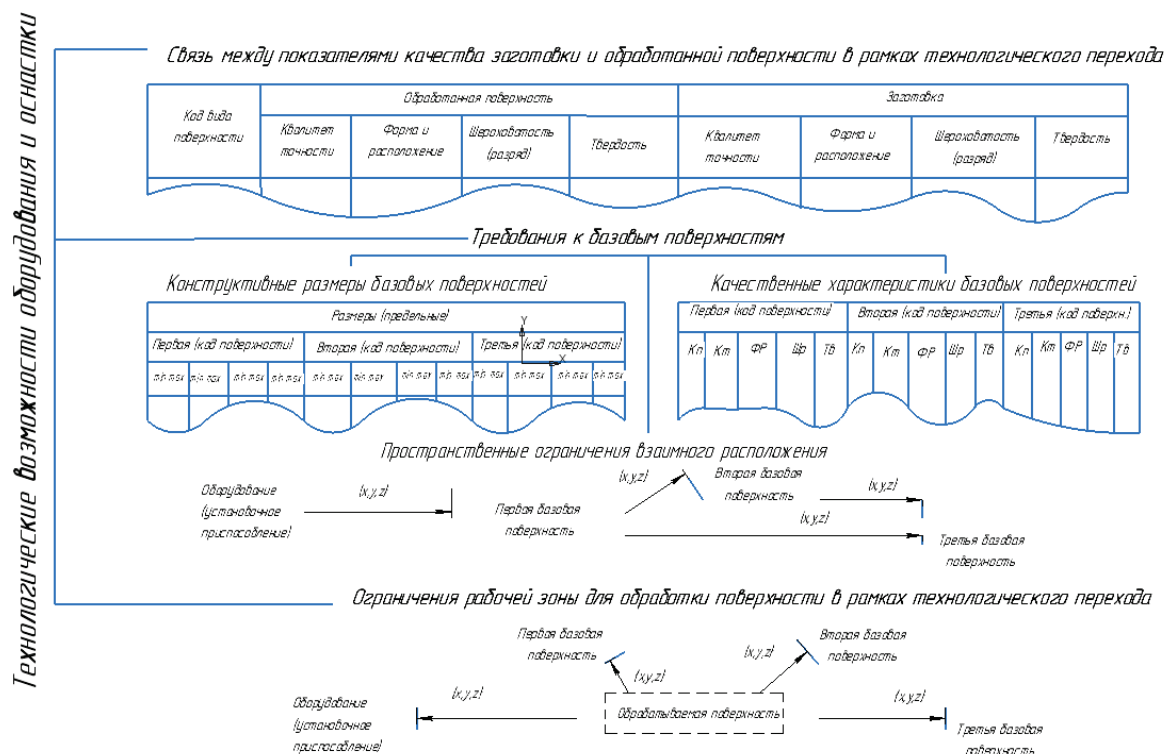


Рис. 1. Структурная схема информационных связей обрабатываемой детали и технологическими возможностями оборудования и оснастки

Fig. 1. Block schematic diagram of the data connections between the processed part and the technological capabilities of the equipment and tooling

Информационные связи охватывают анализ:

- влияния используемого технологического способа на изменение показателей качества обрабатываемой поверхности в рамках технологического перехода;
- предельных размеров качественных характеристик, используемых в качестве базовых поверхностей детали и требования к их взаимному пространственному расположению для варианта выбранной технологической оснастки в системе координат оборудования;
- диапазона рабочей зоны обработки, учитывающей параметры обрабатываемой и базовых поверхностей детали с элементами технологической оснастки.

Для формализованного описания представленной схемы с использованием в качестве математического аппарата теории графов выполнены исследования в следующей последовательности. Первоначально для описания связей между видами базовых и возможного

множества обрабатываемых поверхностей разработан граф (рис. 2).

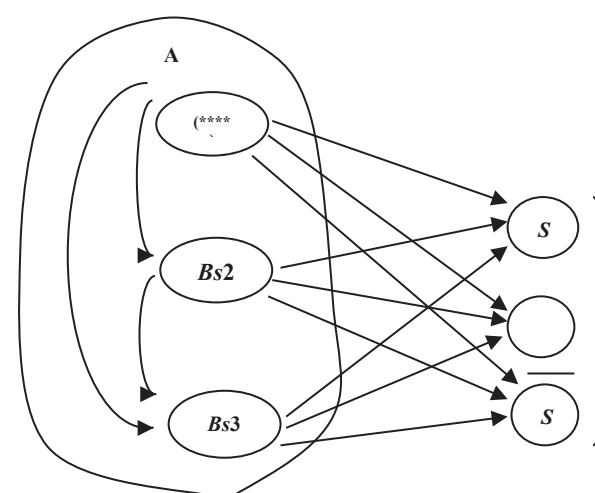


Рис. 2. Граф взаимосвязей базовых и обрабатываемых поверхностей

Fig. 2. Graph of the interrelationships of the bases and operating surfaces

Граф MmD изображающий структуру и взаимосвязи базовых и обрабатываемых поверхностей включает:

– множество вершин $S \subset (BsUSt)$ описывающих применяемые базовые поверхности $Bs = \{Bs1(****), Bs2(****), Bs3(****)\}$, где $(****)$ – код вида элементарной поверхности в соответствии классификатора системы планирования многономенклатурных технологических процессов, и обрабатываемые поверхности $St = \{St1(****), St1(****), \dots, StN(****)\}$, где N – количество возможных видов обрабатываемых поверхностей при использовании рассматриваемого технологического оборудования и технологической оснастки;

– множество дуг $U = \{(Bs1(****), Bs2(****)), (Bs1(****), Bs3(****)), (Bs2(****), Bs3(****)), (Bs1(****), St1(****)), (Bs1(****), St2(****)), \dots, (Bs1(****), StN(****)), \dots, (Bs3(****), StN(****))\}$ описывающих требования к взаимосвязям между поверхностями.

В зависимости от использования для отдельных проектных задач технологической

подготовки производства граф можно записать как $MmD = (S, U)$, так и $MmD = (S, \Gamma)$, где Γ – отображение множеств. Подграф $Abs \subset MmD$, включающий базовые поверхности определяется множеством исходящих дуг U_{Abs}^+ .

На следующем этапе создания графа (рис. 3) каждая из дуг наполняется информацией: Ac – требования к точностным размерным параметрам, устанавливающим связь базовых поверхностей между собой ($Ac_{Bs1-Bc2}$, $Ac_{Bs2-Bc3}$, $Ac_{Bs1-Bc3}$) и обрабатываемыми поверхностями ($Ac_{Bs1-St1}$, $Ac_{Bs2-St1}$, $Ac_{Bs3-St1}$; ...; $Ac_{Bs1-StN}$, $Ac_{Bs2-StN}$, $Ac_{Bs3-StN}$) в рамках рассматриваемого технологического перехода; Mt – требования к взаимному расположению базовых поверхностей между собой ($Mt_{Bs1-Bc2}$, $Mt_{Bs2-Bc3}$, $Mt_{Bs1-Bc3}$) и обрабатываемыми поверхностями ($Mt_{Bs1-St1}$, $Mt_{Bs2-St1}$, $Mt_{Bs3-St1}$; ...; $Mt_{Bs1-StN}$, $Mt_{Bs2-StN}$, $Mt_{Bs3-StN}$) в рамках рассматриваемого технологического перехода.

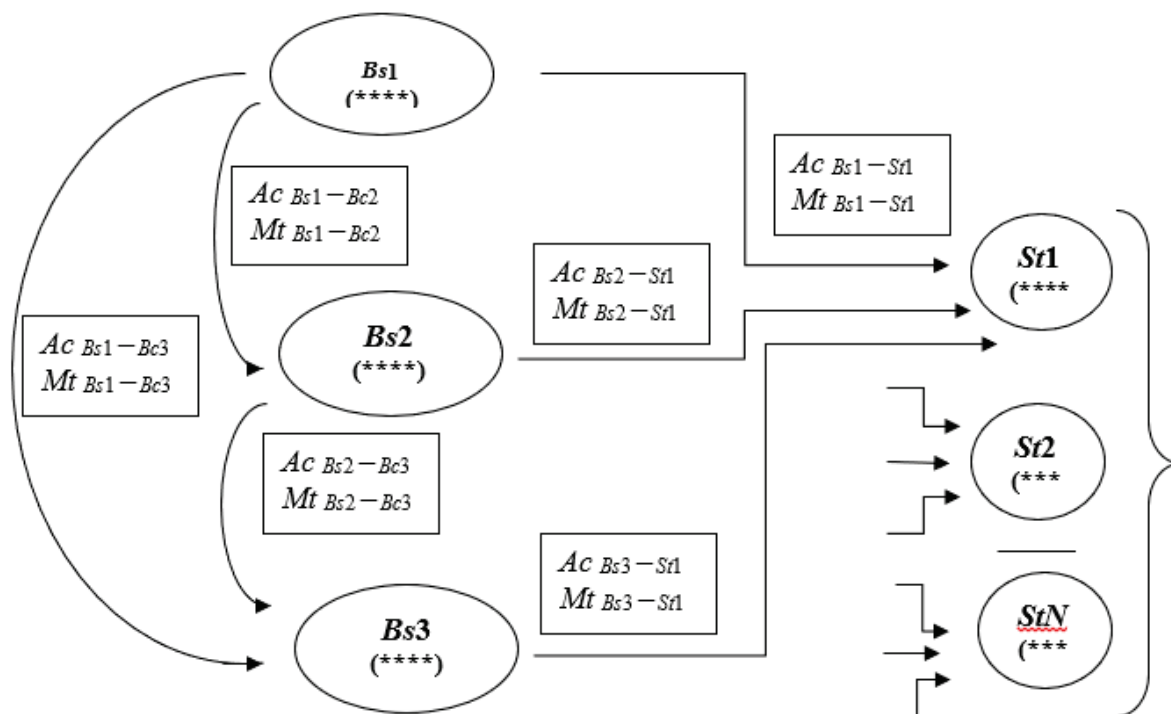


Рис. 3. Граф взаимосвязей базовых и обрабатываемых поверхностей, дополненный требованиями к их точности и взаимному расположению

Fig. 3. Graph of the interrelationships of the bases and operating surfaces, supplemented by requirements for their accuracy and relative location

Для формализованного преобразования графического символического изображения известных широкий набор математических аппаратных и программных средств. Учитывая требования универсальности и максимальной

наглядности, обеспечивающих удобство последующей алгоритмизации проектных процедур, предлагается реляционная форма представления данных (рис. 4).

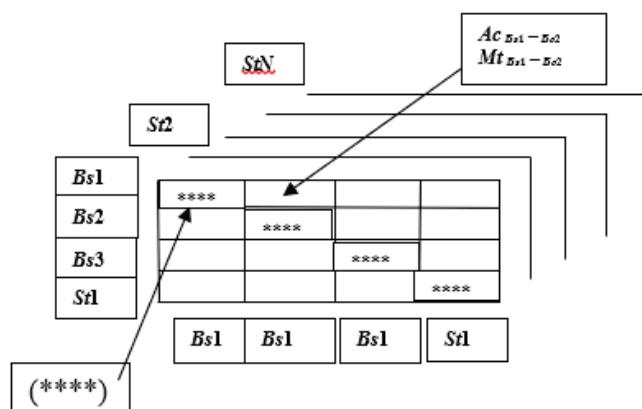


Рис. 4. Структура базы данных информации по связям между базовыми и обрабатываемыми поверхностями

Fig. 4. Structure of the database of information on the relationships between the bases and operating surfaces

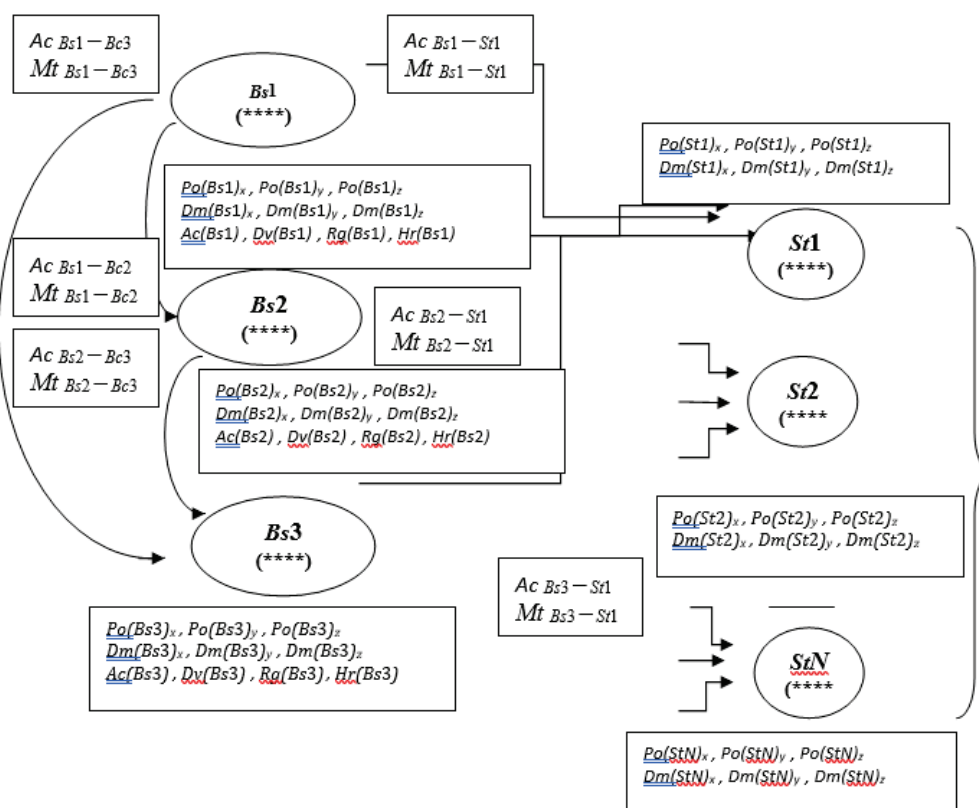


Рис. 5. Граф, дополненный информацией ограничений по расположению поверхностей в системе координат станка и требованиям к характеристикам базовых поверхностей

Fig. 5. Graph supplemented with information on restrictions on the location of surfaces in the coordinate system of the machine and requirements for the characteristics of the bases

Дальнейшее описание графа (рис. 5) заключается в насыщении информацией, относящейся к диапазону значений базовых и обрабатываемых поверхностей: габаритные ограничения по расположению ($Dm(Bs1)_x$, $Dm(Bs1)_y$, $Dm(Bs1)_z$; $Dm(Bs2)_x$, $Dm(Bs2)_y$, $Dm(Bs2)_z$; $Dm(Bs3)_x$, $Dm(Bs3)_y$, $Dm(Bs3)_z$; $Dm(St1)_x$, $Dm(St1)_y$, $Dm(St1)_z$;; $Dm(StN)_x$, $Dm(StN)_y$, $Dm(StN)_z$) и расположение нулевых точек поверхностей в соответствии с принятыми положениями в системе планирования многооперационных технологических процессов

($Po(Bs1)_x$, $Po(Bs1)_y$, $Po(Bs1)_z$; $Po(Bs2)_x$, $Po(Bs2)_y$, $Po(Bs2)_z$; $Po(Bs3)_x$, $Po(Bs3)_y$, $Po(Bs3)_z$; $Po(St1)_x$, $Po(St1)_y$, $Po(St1)_z$;; $Po(StN)_x$, $Po(StN)_y$, $Po(StN)_z$) в трехмерной системе рабочей зоны координат станка. Базовых поверхностей: точности ($Ac(Bs1)$, $Ac(Bs2)$, $Ac(Bs3)$), отклонений от геометрической формы ($Dv(Bs1)$, $Dv(Bs2)$, $Dv(Bs3)$), шероховатости ($Rg(Bs1)$, $Rg(Bs2)$, $Rg(Bs3)$), твердости ($Hr(Bs1)$, $Hr(Bs2)$, $Hr(Bs3)$). Структура реляционной формы представления информации (рис. 6 – 8).

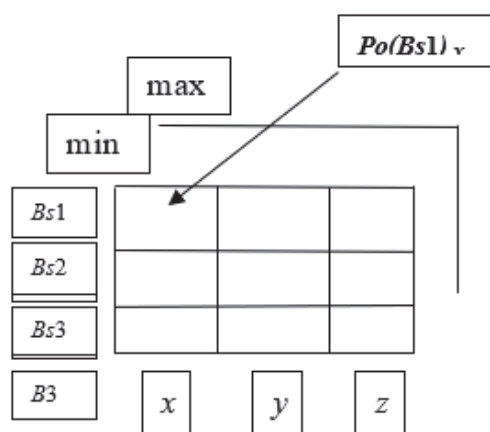


Рис. 6. Структура данных по ограничениям координат расположения нулевых точек поверхностей

Fig. 6. Data structure on restrictions on the coordinates of the location of the zero points of surfaces

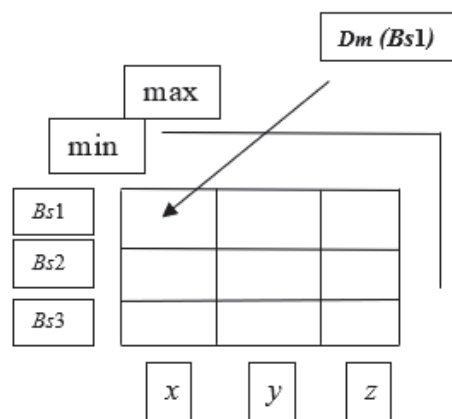


Рис. 7. Структура данных по ограничениям размерных параметров поверхностей

Fig. 7. Data structure on the limitations of the dimensional parameters of surfaces

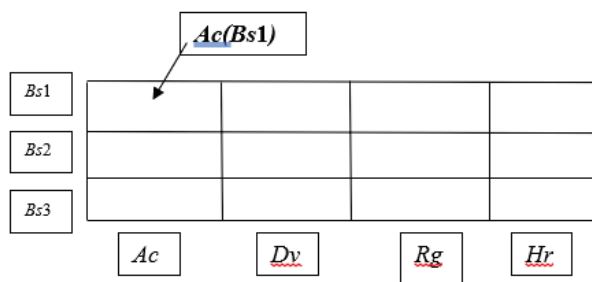


Рис. 8. Структура данных по требованиям к характеристикам базовых поверхностей

Fig. 8. Data structure on the requirements for the characteristics of the bases

Окончательное формирование графа (рис. 9) заключается в занесении информации, связывающей параметры поверхности заготовки (w) и обработанной поверхности (f) для каждого из множества возможных технологических переходов ($Ac_{w-f}(St1)$, $Dv_{w-f}(St1)$, $Rg_{w-f}(St1)$, $Hr_{w-f}(St1)$; $Ac_{w-f}(St2)$, $Dv_{w-f}(St2)$, $Rg_{w-f}(St2)$, $Hr_{w-f}(St2)$;; $Ac_{w-f}(StN)$, $Dv_{w-f}(StN)$, $Rg_{w-f}(StN)$, $Hr_{w-f}(StN)$). На рис. 10 представлена структура реляционного представления технологических связей посредством последовательного изменения параметров поверхностей.

($St2$), $Hr_{w-f}(St2)$;; $Ac_{w-f}(StN)$, $Dv_{w-f}(StN)$, $Rg_{w-f}(StN)$, $Hr_{w-f}(StN)$). На рис. 10 представлена структура реляционного представления технологических связей посредством последовательного изменения параметров поверхностей.

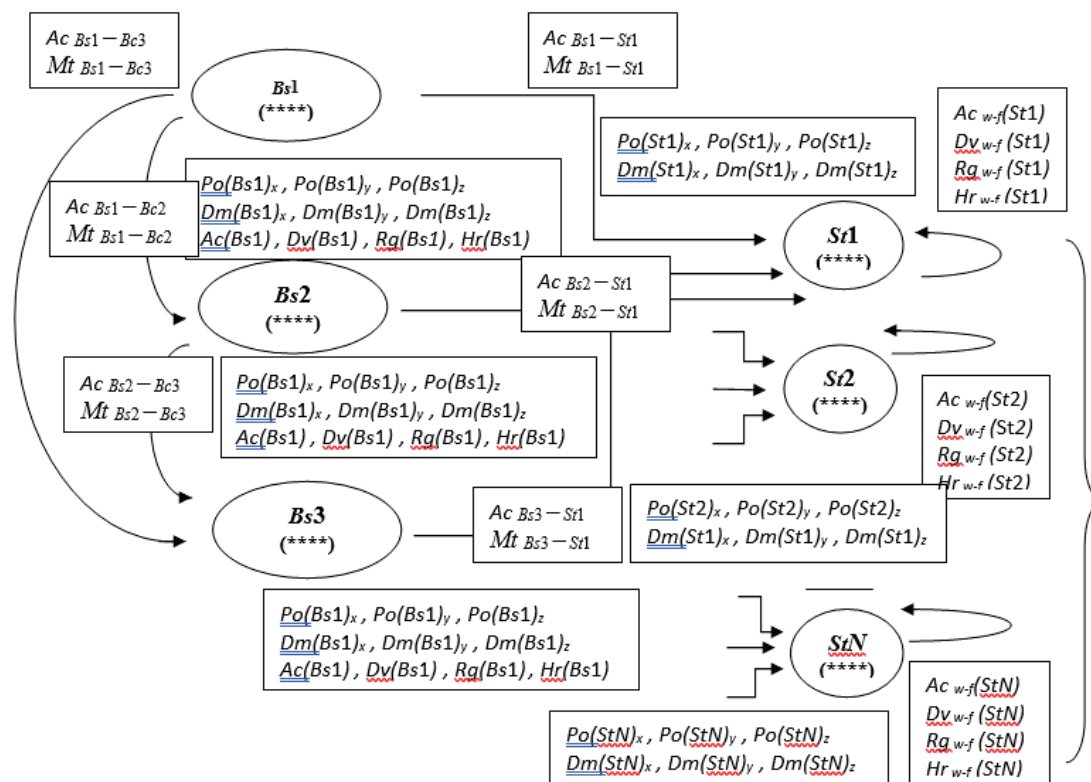


Рис. 9. Граф, дополненный информацией, связывающей параметры заготовки и обработанной поверхности

Fig. 9. Graph supplemented with information interconnecting the parameters of the workpiece and the neat surface

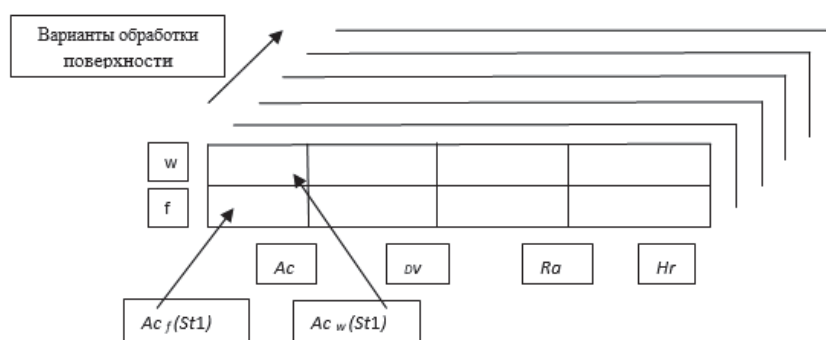


Рис. 10. Структура представления технологических связей посредством последовательного изменения параметров поверхностей

Fig. 10. The structure of the representation of technological connections through sequential changes in surface parameters

Разработанный граф содержит сведения, отражающие исчерпывающую информацию по принятию решений как о возможности выполнения конкретного вида обработки определенной поверхности, так и наличия необходимых базовых поверхностей у изготавливаемой детали, с учетом реального наличия и состояния оборудования, средств технологического оснащения. Структура и описание его однотипна

представлению данных об обрабатываемых деталях [13] и отражает методологию системы планирования многономенклатурных технологических процессов. Представленная система характеристических ограничений имеет открытую структуру, позволяющую их расширение и дополнение. Дополнительным аспектом является наличие в графе информации о предельных размерных характеристиках

поверхностей и компоновки их расположения на детали, соотнесенных к параметрам базовых поверхностей в координатах рабочей зоны станка. Это расширяет возможности и степень обоснованности принятия решений на этапе генерации вариантов последовательности обработки поверхности, и позволяет использовать инструментарий геометрического подхода для трехмерного пространства.

Заложенные при создании графического представления информационного обеспечения технологической подготовки производства предусматривало задачу кардинального снижения трудоемкости и сложности заполнения баз данных на предприятиях и максимальную унификацию на отраслевом уровне. Так работы по созданию структур взаимосвязей базовых и обрабатываемых поверхностей, учитывая известное множество используемого технологического оборудования и стандартной оснастки к ним, одинаково и

может быть выполнено на отраслевом уровне (рис. 11).

Информация к точностным характеристикам этих связей, требования к базовым поверхностям и диапазоны значений базовых и обрабатываемых поверхностей так же имеет свойство универсальности и может быть сформирована производителями станочного оборудования, как методическая технологическая поддержка, или на отраслевом уровне. На долю технологических служб предприятий ложится только обязанность установления параметров взаимосвязи поверхности заготовки и обработанной поверхности для технологических переходов, т. е. непосредственная настройка с учетом реального состояния производства и подходов к его организации. Однако, даже этот этап можно выполнить без участия специализированного персонала, основываясь на нормативных, справочных и статистических данных.

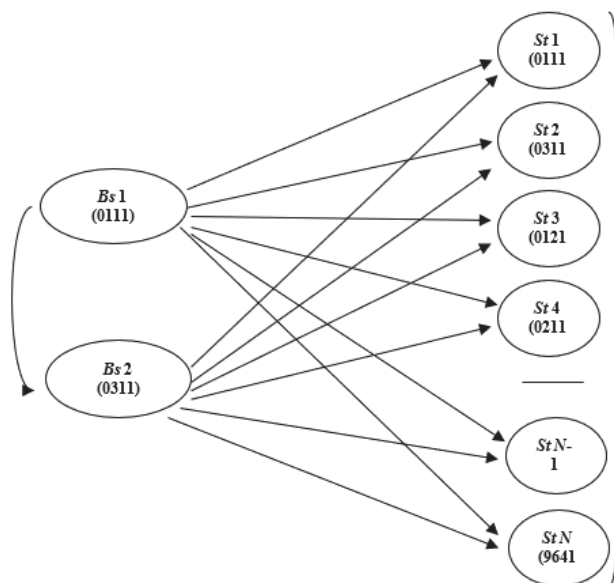


Рис. 11. Граф взаимосвязей базовых и обрабатываемых поверхностей (на примере трехкулачкового патрона) коды поверхностей:

0111 – наружная цилиндрическая; 0311 – наружная торцевая; 0121 – наружная канавка; 0211 – конус наружный; 9111 – внутренняя цилиндрическая; 9641 – центровое отверстие

Fig. 11. Graph of the interrelationships of the bases and working surfaces (using the example of a three-cam chuck) surface codes:

0111 – outer cylindrical; 0311 – outer end face; 0121 – outer groove; 0211 – outer cone; 9111 – inner cylindrical; 9641 – center hole

Закключение

Результатом создания метода конструирования графа, на основе которого формируется база данных в реляционной форме,

является четко структурированное информационное обеспечение выполнения комплекса проектных процедур технологической подготовки механообрабатывающих производств. Разработанная модель отображения

атрибутами теории графов технологических возможностей механообрабатывающего оборудования включает в себя информационную модель установления связей между базовыми и обрабатываемыми поверхностями, назначения диапазонных значений размеров и характеристик поверхностей с учетом конструктивно-компоновочной структуры детали, параметров рабочей зоны оборудования, элементов оснастки, используемых при базировании. Структура создаваемой базы данных в значительной мере ориентирована на анализ установочных и операционных размерных связей, являющихся в значительной мере качественным критерием принятия проектных решений при технологической подготовке механообрабатывающего производства в автоматизированном режиме. Представленные материалы развивают методическую базу информационного обеспечения создания систем автоматизированной технологической подготовки механообрабатывающих производств, учитывающих как реальное состояние действующих систем, так и сложившуюся современную ситуацию в области управления разработкой технологических процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник** технолога / под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. **Базров Б.М.** Базис технологической подготовки машиностроительного производства: монография. М.: КУРС, 2023. 324 с.
3. **Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М., Кондаков А.И.** Направленное формирование свойств изделий машиностроения / под ред. А.И. Кондакова. М.: Машиностроение, 2005. 352с.
4. **Суслов А.Г., Федонин О.Н., Петрешин Д.И.** Фундаментальные основы обеспечения и повышения качества изделий машиностроения и авиакосмической техники. Вестник Брянского государственного технического университета. 2020; 2(87). С. 4–10.
5. **He B., Bai K.J.** Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review // Adv. Manuf. 2021. Vol. 9. P. 1–21.
6. **Chakraborty S., Chowdhury R.** Graph-theoretic-approach-assisted Gaussian Process for Nonlinear Stochastic Dynamic Analysis Under Generalized Loading // Journal of Engineering Mechanics. 2019. Vol. 145. № 12. P. 04019105.
7. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М.** Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка,

производство, прослеживание // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 39–48.

8. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Тихонова Ж.С.** Трансформация информационной структуры как инструмент повышения эффективности многономенклатурного производства // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 4 (154). С. 29–40.

9. **Ингеманссон А.Р.** Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 1 (248). С. 15–18.

10. **Бочкарев П.Ю.** Проектирование маршрутов многономенклатурных технологических процессов механообработки. Саратов: Саратов.гос.техн.ун-т, 1996. 104 с.

11. **Бочкарев П.Ю.** Системное представление планирования технологических процессов механообработки // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10–14.

12. **Бочкарев П.Ю.** Развитие теории и принципов планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки и сборки // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 25–32.

13. **Бочкарев П.Ю., Решетникова Е.П.** Повышение качества технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе расширенного анализа конструктивных характеристик деталей // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 2 (150). С. 30–36.

14. **Иванов А.А., Бочкарев П.Ю.** Оперативное планирование в многономенклатурном производстве. Методы и алгоритмы взаимодействия: монография // Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 270 с.

15. **Митин С.Г., Бочкарев П.Ю., Азиков Н.С.** Метод генерации структур технологических операций для оборудования сверлильной группы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 2. С. 69–74.

REFERENCES

1. Technologist's Handbook / edited by A.G. Suslov. Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2019. 800 p.
2. Bazrov B.M. Basis of Technological Preparation of Mechanical Engineering Production: Monograph. Moscow: KURS, 2023. 324 p.
3. Vasiliev A.S., Dal'skiy A.M., Zolotarevsky Yu.M., Kondakov A.I. Directed Formation of Properties of Mechanical Engineering Products / edited by A.I. Kondakov. Moscow: Mechanical Engineering, 2005. 352 p.
4. Suslov A.G., Fedonin O.N., Petreshin D.I. Fundamental Foundations of Ensuring and Improving the Quality of Mechanical Engineering and Aerospace Products. Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2020; 2(87). P. 4–10.
5. He B., Bai K.J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review // Adv. Manuf. 2021. Vol. 9. P. 1–21.

6. Chakraborty S., Chowdhury R. Graph-theoretic approach-assisted Gaussian Process for Nonlinear Stochastic Dynamic Analysis Under Generalized Loading // Journal of Engineering Mechanics. 2019. Vol. 145. No. 12. P. 04019105.

7. Chigirinsky Yu.L., Kraynev D.V., Frolov E.M. Digitalization of mechanical engineering production: technological preparation, production, tracking // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. No. 8 (134). P. 39–48.

8. Chigirinsky Yu.L., Kraynev D.V., Tikhonova Zh.S. Transformation of the information structure as a tool for increasing the efficiency of multi-product production // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. No. 4 (154). P. 29–40.

9. Ingemansson A.R. Basic provisions of the methodology of technological preparation of production and adaptive control in digital production systems for mechanical processing // Bulletin of the Volgograd State Technical University. 2021. No. 1 (248). P. 15–18.

10. Bochkarev P.Yu. Design of routes for multi-product technological processes of mechanical processing. Saratov: Saratov State Technical University, 1996. 104 p.

11. Bochkarev P.Yu. Systematic representation of planning of technological processes of mechanical processing // Technology of mechanical engineering. 2002. No. 1. Pp. 10–14.

12. Bochkarev P.Yu. Development of the theory and principles of planning of multi-product technological processes of mechanical processing and assembly // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. No. 9 (159). Pp. 25–32.

13. Bochkarev P.Yu., Reshetnikova E.P. Improving the quality of technological preparation of mechanical processing industries based on extended analysis of design characteristics of parts // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. No. 2 (150). Pp. 30–36.

14. Ivanov A.A., Bochkarev P.Yu. Operational planning in multi-product production. Methods and algorithms of interaction: monograph // Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 270 p.

15. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu., Azikov N.S. Method of generating structures of technological operations for drilling group equipment // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2018. No. 2. P. 69–74.

Статья поступила в редакцию 16.10.2024; одобрена после рецензирования 26.10.2024; принята к публикации 08.11.2024.

The article was submitted 16.10.2024; approved after reviewing 26.10.2024; assepted for publication 08.11.2024.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.01.2025. Выход в свет 30.01.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

