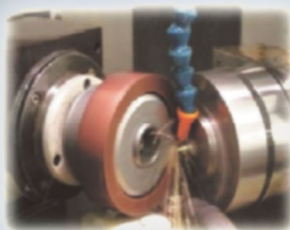


НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

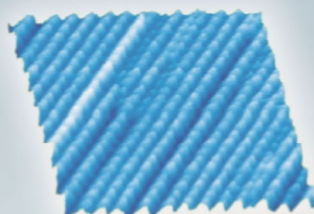
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

7 (169)
2025

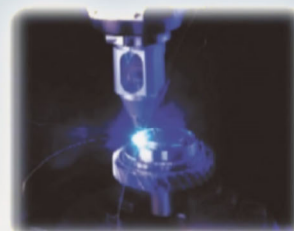
ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



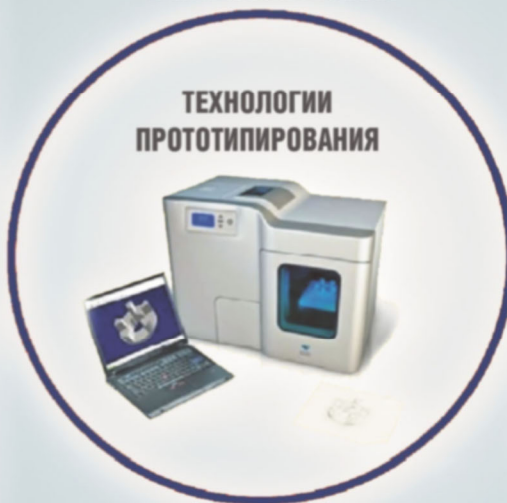
НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ



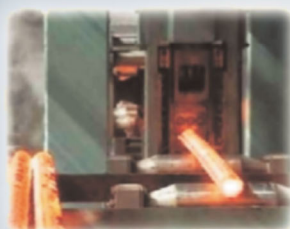
ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



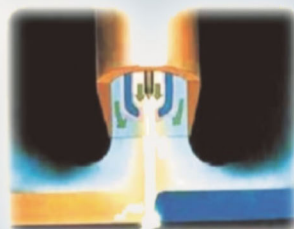
ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ



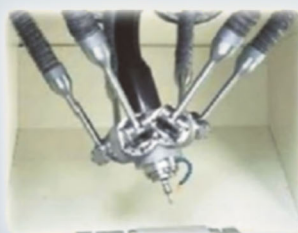
НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ



НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ



ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 7 (169)

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

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С.

Применение ультразвука для модификации поверхностного слоя
деталей, полученных аддитивными технологиями. 3

Лебедев В.А., Кочетов А.Н., Науменко В.А. Физико-технологические
основы повышения стойкости штампового инструмента упрочнением
высокоэнергетическими потоками. 13

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В. Управление неопределенностью
технологической информацией в цифровом производстве 23

Якимович Б.А. Алгоритм технологии изготовления сложных сборных
изделий с использованием цифровых измерительных и
обрабатывающих систем 32

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ТРЕНИЕ И ИЗНОС ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Куксенова Л.И. Влияние физико-химических факторов на структуру
и свойства металлов в условиях контактной деформации при трении
в поверхностно-активной смазочной среде. 39

*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

№ 7 (169)

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)

DOI: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

TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S.

Ultrasonic application for surface layer modifying in parts produced
by additive technologies. 3

Lebedev V.A., Kochetov A.N., Naumenko V.A. Physico-technological
foundations of increasing the durability of die tools by hardening
with high-energy flows 13

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V. Control of technological information
ambiguity in digital production. 23

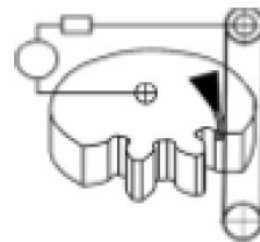
Yakimovich B.A. Algorithm of manufacturing technology for complex
assembled products using digital measuring and processing systems 32

SURFACE LAYER QUALITY, CONTACT INTERACTION, FRICTION AND WEAR OF MACHINE PARTS

Kuksenova L.I. Physical-chemical factors effect on the structure and
properties of metals under conditions of contact deformation
during friction in a surface-active lubricating medium 39

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. № 7 (169). С. 3-12.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 3-12.

Научная статья

УДК 534-8, 621.9.048.6

doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-3-12

Применение ультразвука для модификации поверхностного слоя деталей, полученных аддитивными технологиями

Вячеслав Михайлович Приходько¹, член.-корр. РАН, д.т.н.

Равиль Исламович Нигметзянов², к.т.н.

Сергей Константинович Сундуков³, к.т.н.

Дмитрий Сергеевич Фатюхин⁴, д.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹ prikhodko@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8261-0424>

² lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1443-7584>

³ sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

⁴ mitriy2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

Аннотация. Проанализирован ряд работ, посвященных технологической наследственности изделий, полученных аддитивными технологиями. Одними из основных недостатков методов аддитивного изготовления пластиковых и металлических объектов является высокая шероховатость поверхности, обусловленная послойным нанесением материала. На основе анализа источников определены направления развития ультразвуковой пост-обработки изделий, позволяющие значительно уменьшить шероховатость поверхности. Проведены исследования по финишной обработке пластиковых изделий в тумане растворителя, полученного методом ультразвукового распыления. Метод позволяет регулировать размер капель и скорость их движения, за счёт изменения режимов ультразвукового воздействия. Предложены схемы обработки туманом изделий разных типоразмеров. В результате экспериментальных исследований установлено, что обработка в тумане растворителя, полученного методом ультразвукового распыления, позволяет многократно уменьшить шероховатость поверхности. Для деталей, полученных методом селективного лазерного плавления, предложены различные виды ультразвуковой обработки, позволяющие повысить качество поверхности изделий. Проведены сравнительные исследования воздействия кавитационно-эрозионной и кавитационно-абразивной обработки, а также ультразвукового поверхностного пластического деформирования на снижение шероховатости поверхности. Выявлено, что при всех рассмотренных видах ультразвуковой обработки происходит снижение шероховатости поверхности: при кавитационно-эрозионной на 33 %, при кавитационно-абразивной на 43 %, при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании на 52 %.

Ключевые слова: ультразвук, колебания, 3D-печать, шероховатость, аэрозоль

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: «Создание научно-технических основ применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве» № 24-19-00463

Для цитирования: Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Применение ультразвука для модификации поверхностного слоя деталей, полученных аддитивными технологиями // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-3-12

Ultrasonic application for surface layer modifying in parts produced by additive technologies

Vyacheslav M. Prikhodko¹, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, D. Eng.

Ravil I. Nigmatzyanov², Ph.D Eng.

Sergey K. Sundukov³, Ph.D Eng.

Dmitry S. Fatyukhin⁴, D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, Moscow, Russia

¹ prikhodko@madi.ru

² lefmo@yandex.ru

³ sergey-lefmo@yandex.ru

⁴ mitriy2@yandex.ru

Abstract. A number of works devoted to the technological heredity of products obtained by additive technologies are analyzed. One of the main disadvantages of additive manufacturing methods for plastic and metal objects is the high surface roughness caused by the layering technique. Based on the analysis of the sources, the directions of development of ultrasonic post-treatment of products have been determined. It can significantly reduce surface roughness. Studies have been conducted on the finishing of plastic products in a solvent evaporation obtained by ultrasonic spraying. The technique makes it possible to adjust the size of the droplets and the speed of their movement by changing the modes of ultrasonic treatment. Evaporating treatment schemes for products of different sizes are proposed. As a result of experimental studies, it has been established that evaporating treatment of a solvent obtained by ultrasonic spraying allows significant reduction of the surface roughness. Various types of ultrasonic treatment have been proposed for parts obtained by selective laser melting to improve the surface quality of products. Comparative studies have been conducted on the effects of cavitation-erosion and cavitation-abrasive treatment, as well as ultrasonic surface plastic deformation aimed at reducing surface roughness. It was revealed that all mentioned types of ultrasonic treatment contribute to surface roughness decrease in the following ways: cavitation-erosion by 33 %, cavitation-abrasive by 43 %, ultrasonic surface plastic deformation by 52 %.

Keywords: ultrasound, vibrations, 3D printing, roughness, aerosol

Acknowledgments: The work was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation in the priority area of activity of the Russian Science Foundation “Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups” of the scientific project: “Creation of scientific and technical foundations for the use of ultrasonic technologies in additive manufacturing” No. 24-19-00463

For citation: Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Ultrasonic application for surface layer modifying in parts produced by additive technologies / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-3-12

Введение

Наряду с очевидными преимуществами, получение изделий аддитивными технологиями имеют и ряд значительных недостатков, среди которых наиболее значимыми являются пористость, структурная неоднородность, анизотропия свойств материалов, зависящая от ориентации слоёв [1], вследствие чего происходит значительное изменение характеристик

прочности и пластичности. Наиболее важным вопросом является обеспечение требуемой микрогеометрии функциональных поверхностей аддитивных изделий.

Поскольку качество поверхностного слоя во многом определяет эксплуатационные свойства изделия в целом, то именно высокая шероховатость является основным фактором, препятствующим более широкому применению аддитивных технологий [2].

Пластиковые и металлические изделия, полученные аддитивными технологиями, имеют свои особенности.

Наиболее распространённым способом снижения шероховатости объектов, изготовленных из ABS или PLA, является выдержка изделия в парах растворителя. При контакте поверхности с мелкодисперсными каплями растворителя происходит частичное растворение пластика на поверхности изделия. Поскольку ультразвуковое воздействие на жидкость используется, в том числе, и для создания аэрозолей различной дисперсности, создание тумана растворителя ультразвуком позволяет эффективно производить пост-обработку пластиковых объектов.

Распыление жидкости под воздействием ультразвука основано на таких акустико-технологических эффектах, как кавитация, коагуляция и др. Изменением амплитуды и частоты колебаний достигается возможность регулирования дисперсности капель аэрозоля и их концентрации.

Независимо от химического состава сплавляемого металла для селективного лазерного плавления шероховатость поверхности формируется под воздействием следующих факторов [3 – 5]:

- разбрызгивание металла из ванны расплава;
- сфероидизация жидкого металла под действием сил поверхностного натяжения при удалении пучка лазера от зоны расплавления;
- не полностью расплавленные частички порошка, обладающие различной адгезией к поверхности;
- нерасплавленные частицы порошка, прилипшие к поверхности;
- наличие границ между отдельными слоями, вызванные различной степенью расплавления частиц порошка, располагающихся по границам каждого слоя.

Обработка таких изделий являются актуальными и находят отражение во многих научных работах, в которых предлагаются такие способы как лазерное оплавление поверхностей [6], изостатическое прессование, применяемое, в первую очередь, для уплотнения материала [7, 8], различные виды химического воздействия [9, 10], нанесение покрытий [11] и

поверхностно-пластическое деформирование (ППД) [12].

Недостатком указанных способов является то, что они не обеспечивают возможность обработки сложнопрофильных поверхностей. Для этой цели одним из наиболее эффективных методов является ультразвуковая жидкостная обработка [13, 14]. В этом случае рабочими телами являются кавитационные пузырьки, способные проникать в труднодоступные участки поверхности и осуществлять работу по их изменению [15].

В современных исследованиях по данной тематике рассматриваются два вида ультразвуковой жидкостной обработки [16 – 18]: кавитационно-эрозионная (КЭО) и кавитационно-абразивная (КАО). Результатами во всех исследованиях явилось снижение различных параметров шероховатости и изменение морфологии обрабатываемой поверхности, выраженное в уменьшении количества дефектов на поверхности. При этом результаты очень разнятся и достигаются при различных параметрах обработки: время от одной минуты до нескольких часов, а амплитуды ультразвуковых колебаний от 5 до 80 мкм. Лучшие результаты достигаются при КАО при расстоянии между торцом излучателя и обрабатываемой поверхностью 1...2 мм, что является, по сути, размерной обработкой и не может применяться для обработки сложнопрофильных деталей, или при КЭО и КАО совмещённых с электрохимическим полированием на высоких амплитудах колебаний 60...80 мкм, что приводит к значительному нагреву электролита, что, в свою очередь, ускоряет химические реакции и затрудняет оценку вклада ультразвука в получаемый эффект.

Ряд работ посвящён ультразвуковому ППД [19, 20], которое приводит к значительному снижению шероховатости поверхности, её упрочнению и способствует закрытию пор в приповерхностном слое. Недостатком данного способа является сложности и ограничения при обработке сложнопрофильных поверхностей, связанные со сложностью подведения индентора ультразвуковой колебательной системы к труднодоступным местам.

Таким образом, требуется проведение дополнительных исследований для более подробного изучения влияния различных видов

ультразвуковой обработки на свойства поверхностей, полученных аддитивными технологиями, и оптимизация режимов с целью обработки сложнопрофильных изделий.

Исходя из вышесказанного, целью работы является: определение влияния различных видов ультразвуковой обработки на микрогеометрию поверхностей пластиковых и

металлических изделий, полученных методами 3D печати.

Обработка пластиковых объектов (на примере ABS-пластика)

Обработка пластиковых изделий проводилась по схемам, представленным на рис. 1.

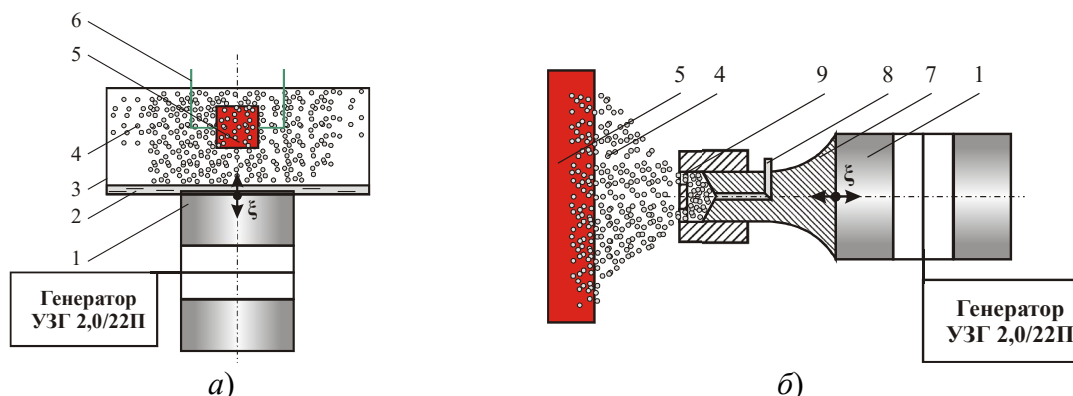


Рис. 1. Схемы ультразвуковой обработки пластиковых изделий парами растворителя:

а – малогабаритных; *б* – крупногабаритных (1 – пьезокерамический преобразователь; 2 – ацетон; 3 – стеклянный излучатель; 4 – капли аэрозоля; 5 – образец; 6 – подвес; 7 – концентратор; 8 – канал для подачи растворителя; 9 – сопло)

Fig. 1. Schemes of ultrasonic treatment of plastic products with solvent vapors:

a – small-sized; *b* – large (1 – piezoceramic transducer; 2 – acetone; 3 – glass radiator; 4 – aerosol droplets; 5 – sample; 6 – suspension; 7 – concentrator; 8 – solvent supply channel; 9 – the nozzle)

Схема объёмной обработки изделий показана на рис. 1, *а*. Ультразвуковая колебательная система (полуволновой пьезокерамический преобразователь 1) встраивается в дно ванны 3. В ванну подаётся растворитель 2, который покрывает дно ванны и торец излучателя тонким слоем. При включении генератора УЗГ, электрические колебания подаются на пьезокерамический преобразователь. Под действием колебаний торца излучателя растворитель распыляется в объёме ванны и образует туман. В тумане с помощью подвеса 6 размещается образец 5.

Приведённая схема обработки наиболее эффективна для изделий сложной формы небольшого размера, поскольку размер зоны устойчивого образования тумана соизмерим с размерами излучающей поверхности.

Для обработки изделий, размеры которых значительно больше размеров излучающей поверхности, используется схема обработки, приведённая на рис. 1, *б*. В этом случае образование тумана происходит с помощью концентратора 7, соединённого с излучателем 1.

Растворитель подаётся в канал излучателя 8, через который попадает на торец концентратора. Образовавшийся туман через сопло 9 поступает к обрабатываемой поверхности. Обработка больших поверхностей достигается за счёт взаимного перемещения изделия и колебательной системы.

На 3D-принтере PICASO 3D Designer из ABS-пластика KUMHO ABS 750 на одинаковых режимах печатались два типа образцов (по 2 штуки каждый). Один – в виде кубиков 20×20×20 мм, другой – в виде пластины 100×200×5 мм. По одному образцу каждого типа оставались в качестве контрольных. Вторые экземпляры образцов обрабатывались в аэрозоле, полученном методом ультразвукового распыления ацетона. Меньший – по схеме, представленной на рис. 1, *а*, больший – по схеме, представленной на рис. 1, *б*.

Резонансная частота составляла 22,3 кГц, амплитуда колебаний 3...5 мкм. Излучаемая мощность составляла 50 Вт.

Образец 20×20×20 мм с помощью подвеса размещался на расстоянии 30 мм над

уровнем ацетона. При включении генератора на торце колебательной системы образовывались капли ацетона, образуя туман. Время экспозиции образцов составляло 10 с.

Образец $100 \times 200 \times 5$ мм располагался неподвижно на расстоянии 30 мм от распылителя. После включения питания генератора и образования тумана, колебательная система перемещалась вдоль поверхности образца со скоростью 0,5 м/мин.

После обработки поверхности образцов, обращенные к излучателю, исследовались с помощью микроскопа и профилометра.

В результате исследования было выявлено, что схема ультразвукового распыления

незначительно влияет на изменение микрогеометрии поверхностей образцов после обработки.

На поверхность образцов после печати хорошо заметны наплавленные слои, образующие шероховатость. После обработки в тумане по схемам рис. 1, пластик на поверхности частично растворяется и в жидком состоянии заполняет впадины микронеровностей, что приводит к значительному снижению высотных параметров шероховатости. В этом случае на поверхности визуально заметны «наплывы», являющиеся областями взаимодействия поверхности и капель растворителя.

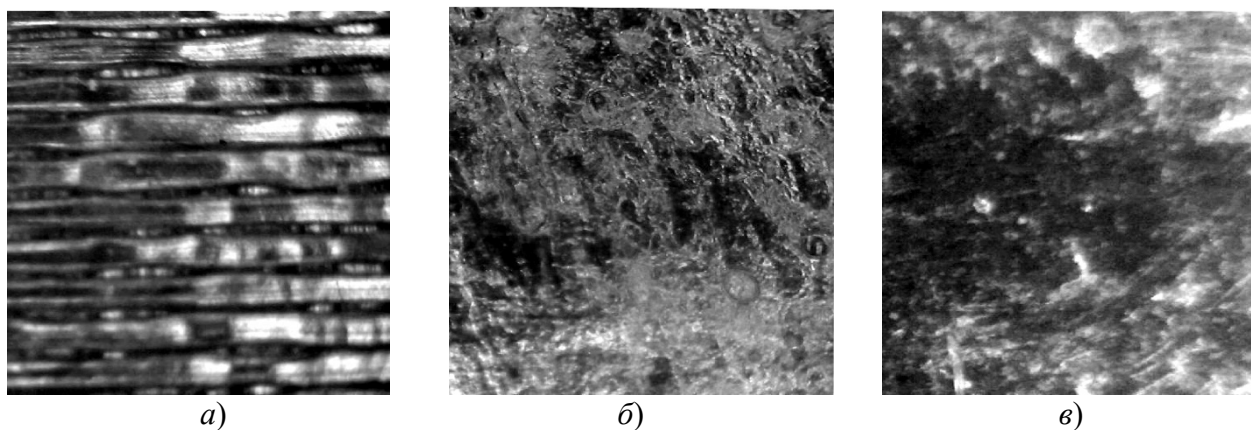


Рис. 2. Фотографии поверхности образцов ($0,5 \times 0,5$ мм):

a – после 3D-печати; *б* – после обработки в аэрозоле по схеме рис. 1, *a*; *в* – после обработки в аэрозоле по схеме рис. 1, *б*

Fig. 2. Photos of the surface of the samples ($0,5 \times 0,5$ mm):

a – after 3D printing; *b* – after aerosol treatment according to the scheme fig. 1, *a*; *c* – after aerosol treatment according to the scheme fig. 1, *b*

Измерения шероховатости полученных образцов проводились профилометром модели 130. Данные по изменению среднего арифметического отклонения профиля (Ra), высоты

неровностей профиля по 10 точкам (Rz), среднего шага местных выступов (Sm) и среднего шага неровностей профиля (S) приведены в табл. 1.

1. Изменение шероховатости поверхности образцов при обработке в аэрозоле

1. Changes in the surface roughness of samples during aerosol treatment

Шероховатость поверхности	Способ обработки		
	3D-печать	обработка в аэрозоле по схеме рис. 1, <i>a</i>	обработка в аэрозоле по схеме рис. 1, <i>б</i>
Ra , мкм	22,7	1,34	1,73
Rz , мкм	85,8	6,9	7,1
Sm , мм	0,414	0,213	0,227
S , мм	0,174	0,007	0,008

По сравнению со значениями шероховатости контрольного образца, у образцов, обработанных в тумане растворителя, произошло значительное снижение высотных и шаговых параметров.

На основании проведённых исследований можно констатировать, что метод обработки пластиковых деталей, изготовленных методом FDM-печати в тумане растворителя, полученного ультразвуковым распылением, эффективен для снижения шероховатости поверхности.

Ультразвуковая обработка поверхностей, полученных послойным синтезом металлических объектов (на примере сплава Ti6Al4V)

Ультразвуковое воздействие на поверхности, полученные послойным синтезом, проводилось кавитационно-эрозионной обработкой (КЭО), кавитационно-абразивной обработкой (КАО) и ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием (ППД).

Предварительные эксперименты по проведению жидкостных процессов КЭО и КАО показали, что прочная оксидная плёнка на образцах из Ti6Al4V имеет высокую кавитационную стойкость. Для повышения эффективности ультразвукового воздействия обработка проводилась в травильном растворе, состоящем из плавиковой и азотной кислот, а также дистиллированной воды (3 % HF + 5 % HNO₃ + H₂O).

КЭО и КАО проводились по схеме, представленной на рис. 3, а, поверхностное пластическое деформирование по схеме, представленной на рис. 3, б.

Процессы КЭО и КАО проводились при погружении в жидкость концентратора ультразвуковой стержневой колебательной системы. Расстояние между торцом концентратора и обрабатываемой поверхностью образца составляло 20 мм.

При КЭО в жидкости, оказавшейся под переменным воздействием сжимающих и растягивающих сил, образуются кавитационные пузырьки, которые осциллируют, схлопываются, объединяются, перемещаются в обрабатываемом объёме под действием акустических потоков, т.е. производят механическую работу. Перечисленные механизмы деформируют поверхность, способствуют удалению непрочных связанных с поверхностью частиц (металлического порошка).

При КАО в жидкость добавлялся абразив, в качестве которого использовался порошок карбида бора B₄C, имеющий высокую твёрдость и устойчивость к химическому воздействию, в объёмной концентрации 20 %. После включения ультразвука под действием потоков абразив распределялся по объёму. В этом случае большая часть энергии, образующаяся при схлопывании, осцилляции и перемещении пузырьков, передаётся абразивным частицам, которые, ударяясь о поверхность, совершают микрорезание, т.е. обработка происходит в результате суммарного действия кавитационных пузырьков и микрорезания.

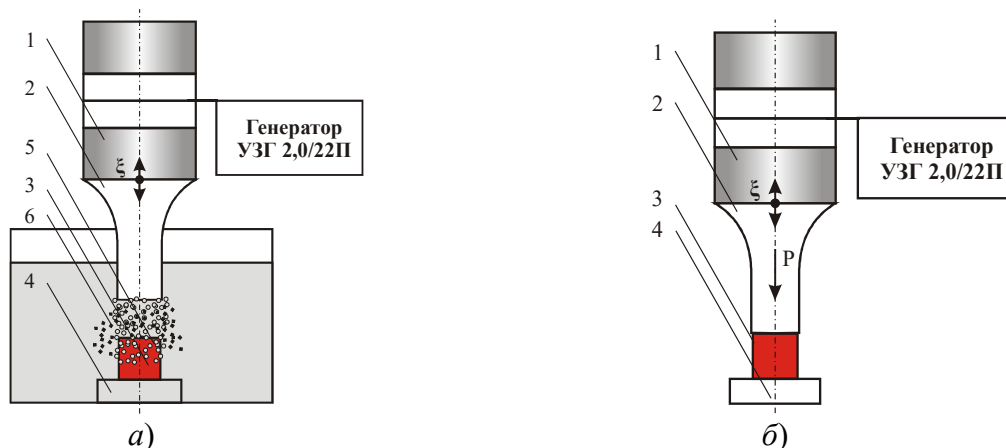


Рис. 3. Схемы ультразвуковой обработки образцов из Ti6Al4V:

а – жидкостной обработки; б – поверхностным – пластическим деформированием (1 – пьезокерамический преобразователь; 2 – концентратор; 3 – образец; 4 – подставка; 5 – кавитационные пузырьки; 6 – абразив)

Fig. 3. Schemes of ultrasonic processing of samples made of Ti6Al4V: а – liquid treatment; б – surface plastic deformation (1 – piezoceramic transducer; 2 – concentrator; 3 – sample; 4 – stand; 5 – cavitation bubbles; 6 – abrasive)

При поверхностном пластическом деформировании (рис. 3, б) торец концентратора прижимался к обрабатываемой поверхности с силой $P = 70$ Н. Под действием нормально приложенной к поверхности силы происходит деформирование выступов неровностей. Высота сфер уменьшается с образованием плоской площадки, одновременно они растут в ширину и начинают касаться других сфер. В результате

на поверхности образуются деформированные области большой площади. Наибольшая площадь достигается при 10 с. обработки. С увеличением времени обработки значительных изменений не происходит, что связано с достижением максимальной степени деформации.

Фотографии поверхности образцов до и после ультразвуковой обработки представлены на рис. 4.

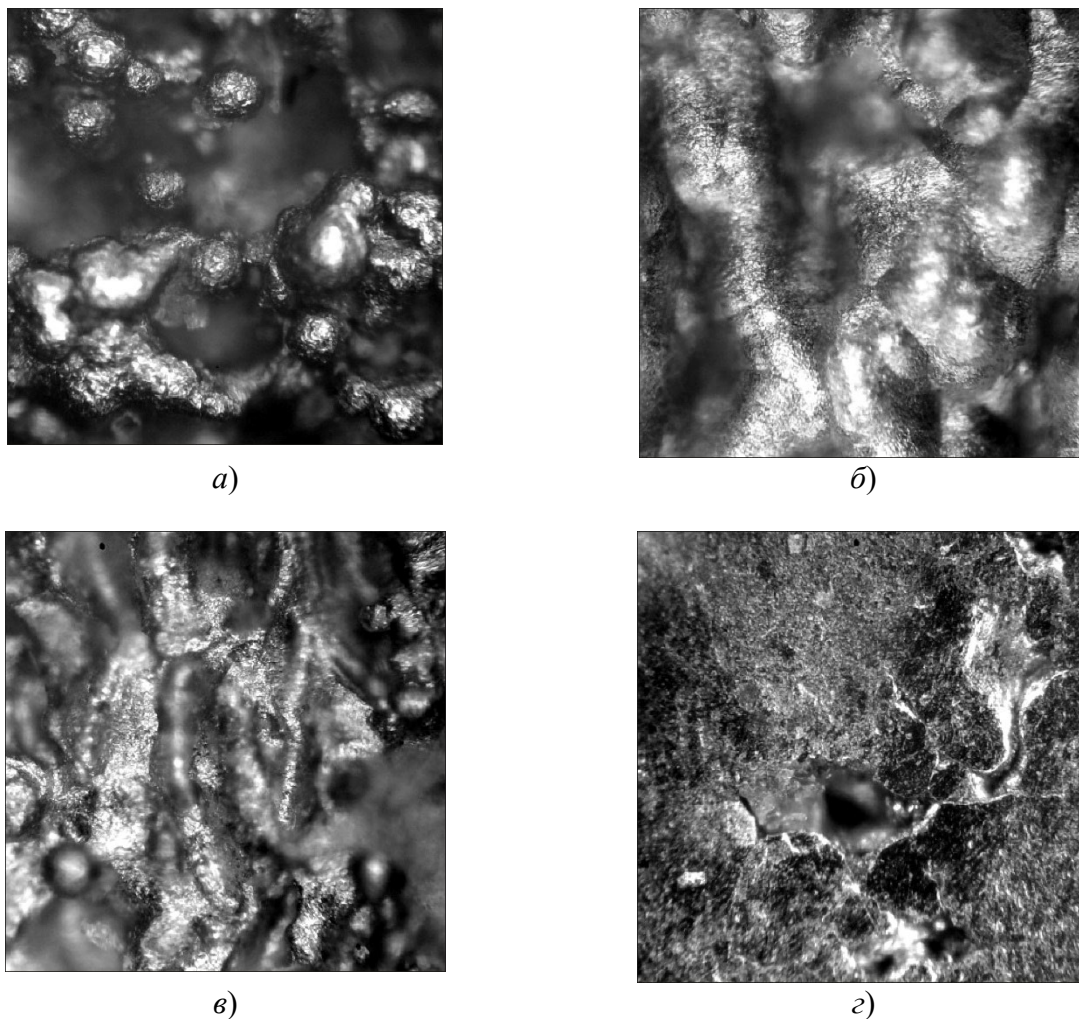


Рис. 4. Фотографии поверхности образцов (0,5×0,5 мм):

а – после 3D-печати; б – после КЭО; в – после КАО; г – после ППД

Fig. 4. Photos of the sample surface (0,5×0,5 mm):

а – after 3D printing; б – after CEO; в – after CAO; г – after FPM

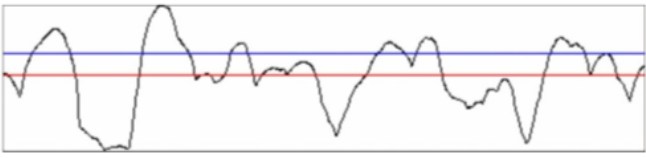
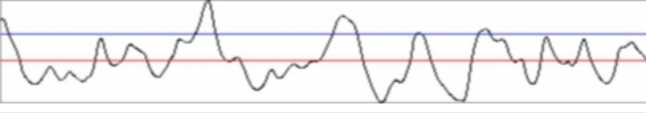
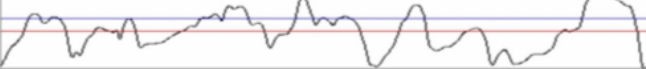
Полученные при рассмотренных видах обработки изменения поверхности приводят к изменению её шероховатости. Профиль микро-неровностей контрольного образца представляет собой чередование выступов с

закруглёнными пиками и впадин с наибольшей высотой неровностей профиля $R_{\max} = 174$ мкм.

Рассмотренные ультразвуковые методы обработки приводят к значительным изменениям параметров шероховатости (табл. 2).

2. Изменение шероховатости поверхности образцов при различных видах пост-обработки

2. Changes in surface roughness of samples during various types of post-treatment

Обработка	Участок профиля поверхности (2,5 мм)	Параметры шерохова- тости, мкм
Без обработки		$Ra = 28,6$ $Rz = 114$
КЭО		$Ra = 19,3$ $Rz = 94,2$
КАО		$Ra = 16,2$ $Rz = 80,5$
УЗ ППД		$Ra = 13,6$ $Rz = 76,3$

Так после КЭО профиль поверхности выравнивается и состоит из близких по размеру выступов и впадин, что связано с отсутствием на поверхности дефектов сферической формы. Параметр Ra уменьшается до 19,3 мкм.

Профиль после КАО отличается меньшим количеством впадин, и большим количеством деформированных абразивом выступов. При этом Ra уменьшается до 16,2 мкм, т.е. снижение составляет 43,5 %. Также профилограмма после данного способа обработки имеет наименьшую высоту 89 мкм.

Рельеф поверхности после ультразвукового ППД за счёт наличия больших ровных площадок имеет наименьшее значение $Ra = 13,6$ мкм, но при этом перепад высотой выступов и глубиной впадин доходит до 98 мкм, что больше, чем при КАО. Это показывает, что совместное кавитационно-абразивное воздействие является более эффективным способом уменьшения выступов поверхности.

Выводы

Проведённые исследования модификации поверхностного слоя деталей, полученных аддитивными технологиями, показали эффективность применения ультразвука для пластиковых и металлических изделий.

В случае изделий из пластика, обработка в тумане растворителя позволяет снизить высотные параметры шероховатости более чем в 10 раз. Поскольку изменение микрогеометрии поверхности достигается за счёт попадания капель тумана на обрабатываемую поверхность, управление размерами капель и их количеством позволяет управлять процессом обработки. Регулирование характеристик тумана достигается изменением параметров ультразвукового воздействия.

Использование ультразвука для создания тумана позволяет проводить обработку без нагрева растворителя, что обеспечивает возможность более тонкой обработки пластиков.

Сравнительные исследования различных видов ультразвуковой обработки образцов из титанового сплава Ti6Al4V, полученных методом селективного лазерного плавления, позволили предложить ряд технологических решений.

При жидкостных кавитационно-эрозионной и кавитационно-абразивной видах обработки в качестве технологической среды рациональным является использование травителя (3 % HF + 5 % HNO₃ + H₂O), позволяющего снять кавитационно-стойкую оксидную плёнку.

КЭО в течение 15 мин приводит к удалению сферических дефектов поверхности,

которая после обработки представляет собой чередование дорожек расплава. При КАО возникающие давления и температуры в значительной мере воспринимаются абразивными частицами, которые получая ускорение, совершают микрорежущие действия, в результате которых часть дефектов удаляется, а часть деформируется. Обработка методом ультразвукового ППД приводит к смятию дефектов поверхности и образованию на ней больших плоских участков

При всех рассмотренных видах ультразвуковой обработки происходит снижение шероховатости поверхности: Ra при КЭО снижается на 33 %, при КАО на 43 %, при ультразвуковом ППД на 52 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Чуканов А.Н.** Определение коэффициента анизотропии и скорости локальной деформации в аддитивных сплавах / А.Н. Чуканов, В.А. Коротков, А.А. Яковенко // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-koeffitsienta-anizotropii-i-skorosti-lokalnoy-deformatsii-v-additivnyh-splavah> (дата обращения: 08.04.2025).
2. **Сундуков С.К.** Ультразвуковые технологии в процессах получения неразъёмных соединений. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Технополиграфцентр», 2023. 269 с. ISBN 978-5-94385-209-1.
3. **Bai Y.** Evolution mechanism of surface morphology and internal hole defect of 18Ni300 maraging steel fabricated by selective laser melting // Journal of Materials Processing Technology. 2022. Vol. 299. P. 118. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2021.117328
4. **Li C.** Surface characteristics enhancement and morphology evolution of selective-laser-melting (SLM) fabricated stainless steel 316L by laser polishing // Optics & Laser Technology. 2023. Vol. 162. P. 10. DOI:10.1016/j.optlastec.2023.109246
5. **Shi X.** Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting // Optics & Laser Technology. 2020. Vol. 132. P. 106. DOI:10.1016/j.optlastec.2020.106471
6. **Giorleo L.** Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas // Procedia CIRP. 2015. Vol. 33. P. 446–451. DOI:10.1016/j.procir.2015.06.102
7. **Kumar A.Y.** The effects of Hot Isostatic Pressing on parts fabricated by binder jetting additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 24. P. 115–124. DOI:10.1016/j.addma.2018.09.021
8. **Popov V.V.** Effect of hot isostatic pressure treatment on the electron-beam melted Ti-6Al-4V specimens // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 21. P. 125–132. DOI:10.1016/j.promfg.2018.02.102
9. **Lyczkowska-Widlak E.** Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing

// Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014. Vol. 14 (4). P.586–594. DOI:10.1016/j.acme.2014.03.001

10. **Jain S.** Electrochemical polishing of selective laser melted Inconel 718 // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 34. P. 239–246. DOI:10.1016/j.promfg.2019.06.145

11. **Slegers S.** Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating // Coatings. 2017. Vol. 7. P. 208. DOI:10.3390/coatings7120208

12. **Hosseinzadeh A.** Severe plastic deformation as a processing tool for strengthening of additive manufactured alloys // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 68 (2). P. 788–795. DOI:10.1016/j.jmapro.2021.05.070

13. **Nigmatzyanov R.I.** Additive Manufacturing with Ultrasound // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37 (12). P. 1070–1073. DOI:10.3103/S1068798X17120140.

14. **Sundukov S.K.** Ultrasonic Vibration Mechanism in Making Permanent Joints // Steel in Translation. 2024. Vol. 54 (1). P. 10–15. DOI:10.3103/S0967091224700190.

15. **Grigoriev S.N.** et al. Effect of cavitation erosion wear, vibration tumbling, and heat treatment on additively manufactured surface quality and properties // Metals. 2020. Vol. 10 (11). P. 1540. DOI 10.3390/met10111540.

16. **Jeon J.H.** et al. Effect of electropolishing on ultrasonic cavitation in hybrid post-processing of additively manufactured metal surfaces // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 120. P. 703–711. DOI:10.1016/j.jmapro.2024.04.092

17. **Wang Q.** et al. Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing and its fundamental performance in Al6061 machining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 113. P. 473–481. DOI:10.1007/s00170-021-06666-7

18. **Приходько В.М.** Современные направления ультразвуковой жидкостной обработки в машиностроении / В. М. Приходько, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, Д. С. Фатюхин // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 8 (122). С. 12–17. DOI 10.30987/2223-4608-2021-8-12-17. EDN YFXYYC.

19. **Teramachi A.** Improving the surface integrity of additive-manufactured metal parts by ultrasonic vibration-assisted burnishing // Journal of Micro- and Nano-Manufacturing. 2019. Vol. 7 (2). P. 24. DOI:10.1115/1.4043344

20. **Нигметзянов Р.И.** Способы ультразвукового поверхностного пластического деформирования / Р. И. Нигметзянов, В. М. Приходько, С. К. Сундуков [и др.] // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 7 (133). С. 33–39. DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39. EDN EGTURS.

REFERENCES

1. Chukanov A.N. Determination of the anisotropy coefficient and the rate of local deformation in additive alloys / A.N. Chukanov, V.A. Korotkov, A.A. Yakovenko [et al.] // Izvestiya TulSU. Technical sciences. 2024, no. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-koeffitsienta-anizotropii-i-skorosti-lokalnoy-deformatsii-v-additivnyh-splavah> (date of access: 08.04.2025).

2. Sundukov S.K. Ultrasonic technologies in the processes of obtaining permanent joints. Moscow: Techpoligrastsentr Limited Liability Company, 2023, 269 p. ISBN 978-5-94385-209-1.
3. Bai Y. et al. Evolution mechanism of surface morphology and internal hole defect of 18Ni300 maraging steel fabricated by selective laser melting // Journal of Materials Processing Technology. 2022. Vol. 299. P. 117328. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2021.117328
4. Li C. et al. Surface characteristics enhancement and morphology evolution of selective-laser-melting (SLM) fabricated stainless steel 316L by laser polishing // Optics & Laser Technology. 2023. Vol. 162. P. 109246. DOI:10.1016/j.optlastec.2023.109246
5. Shi X. et al. Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting // Optics & Laser Technology. 2020. Vol. 132. P. 106471. DOI:10.1016/j.optlastec.2020.106471
6. Giorleo L. et al. Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas // Procedia CIRP. 2015. Vol. 33. P. 446–451. DOI:10.1016/j.procir.2015.06.102
7. Kumar A. Y. et al. The effects of Hot Isostatic Pressing on parts fabricated by binder jetting additive manufacturing // Additive Manufacturing 2018. Vol. 24. P. 115–124. DOI:10.1016/j.addma.2018.09.021
8. Popov V. V. et al. Effect of hot isostatic pressure treatment on the electron-beam melted Ti-6Al-4V specimens // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 21. P. 125–132. DOI:10.1016/j.promfg.2018.02.102
9. Lyczkowska-Widlak E. et al. Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014. Vol. 14 (4). P. 586–594. DOI:10.1016/j.acme.2014.03.001
10. Jain S. et al. Electrochemical polishing of selective laser melted Inconel 718 // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 34. P. 239–246. DOI:10.1016/j.promfg.2019.06.145
11. Slegers S. et al. Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating // Coatings. 2017. Vol. 7. P. 208. DOI:10.3390/coatings7120208
12. Hosseinzadeh A. et al. Severe plastic deformation as a processing tool for strengthening of additive manufactured alloys // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 68 (2). P. 788–795. DOI:10.1016/j.jmapro.2021.05.070
13. Nigmatzyanov R.I. et al. Additive Manufacturing with Ultrasound // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37 (12). P. 1070–1073. DOI:10.3103/S1068798X17120140.
14. Sundukov S. K. Ultrasonic Vibration Mechanism in Making Permanent Joints // Steel in Translation. 2024. Vol. 54 (1). P. 10–15. DOI:10.3103/S0967091224700190.
15. Grigoriev S. N. et al. Effect of cavitation erosion wear, vibration tumbling, and heat treatment on additively manufactured surface quality and properties // Metals. 2020. Vol. 10 (11). P. 1540. DOI 10.3390/met10111540.
16. Jeon J. H. et al. Effect of electropolishing on ultrasonic cavitation in hybrid post-processing of additively manufactured metal surfaces // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 120.
17. Wang Q. et al. Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing and its fundamental performance in Al6061 machining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 113. P. 473–481. DOI:10.1007/s00170-021-06666-7
18. Prikhodko V. M. Modern directions of ultrasonic liquid treatment in mechanical engineering / V. M. Prikhodko, R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov, D. S. Fatyukhin // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2021, no. 8 (122), pp. 12–17. DOI 10.30987/2223-4608-2021-8-12-17. EDN YFXYYC.
19. Teramachi A. et al. Improving the surface integrity of additive-manufactured metal parts by ultrasonic vibration-assisted burnishing // Journal of Micro-and Nano-Manufacturing. 2019. Vol. 7 (2) P. 24. DOI:10.1115/1.4043344
20. Nigmatzyanov R. I. Methods of ultrasonic surface plastic deformation / R. I. Nigmatzyanov, V. M. Prikhodko, S. K. Sundukov [et al.] // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 7 (133), pp. 33–39. DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39. EDN EGTURS

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 24.04.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 24.04.2025; approved after reviewing 14.05.2025; assepted for publication 19.05.2025.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 13-22.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 13-22.

Научная статья

УДК 621.793.6

doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-13-22

Физико-технологические основы повышения стойкости штампового инструмента упрочнением высокоэнергетическими потоками

Валерий Александрович Лебедев¹, к.т.н.

Андрей Николаевич Кочетов², к.т.н.

Виктор Александрович Науменко³, аспирант

^{1, 2, 3} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ va.lebedev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1838-245X>

² ankochetow@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8904-8638>

³ viktor28021999@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0661-8114>

Аннотация. Рассмотрены вопросы формирования условий равновесия в упорядоченных дислокационных структурах, полученных посредством воздействия высококонцентрированных потоков электрической энергии и неформального (продольно-крутильного) ультразвукового поля на токопроводящий материал подложки. Показано влияние твердых поверхностных пленок на деформацию и разрушение, которые выступая в роли преграды, способны подавлять возникновение новых дислокаций в ходе деформационных процессов металлов. Установлены факторы, которые в большей степени определяют эффективность пленки в создании барьера для дислокаций. Предложена упрощенная аналитическая модель взаимодействия единичной дислокации с полученными методом комбинированного упрочнения слоями и условия равновесия дислокаций в пленке заданной толщины. Представлены результаты экспериментальных исследований упрочнённого слоя, сформированного при анодировании вольфрамом и медью на стали марки 20, которые показали, что увеличение прочности изделия происходит в условиях, когда модуль сдвига кристалла-основы меньше модуля сдвига напыленного слоя, и сила, действуя со стороны этого слоя, стремится оттолкнуть дислокацию от границы раздела фаз. В результате исследования влияния процесса электроакустического напыления на качество и износостойкость поверхности штампового инструмента подтверждено, что электроакустическое напыление, реализуя сложное воздействие на металл, обеспечивает повышение качества кромок инструментов и их прочностных характеристик, формируя прогнозируемую организацию структуры поверхностного слоя; создаваемый, в процессе электроакустического напыления, на поверхности «двойной барьер», препятствующий выходу дислокаций на поверхность, является, основным фактором повышения прочностных свойств инструмента. Установлено, что покрытие, нанесенное электроакустическим методом, увеличивает ресурс работы в 1,5 – 2 раза по отношению к образцам, поверхность которых не обрабатывалась вышеупомянутым методом.

Ключевые слова: дислокационные структуры, высокоэнергетические потоки, упрочнённый слой, электроакустическое напыление, качество, износостойкость, формообразующий инструмент

Для цитирования: Лебедев В.А., Кочетов А.Н., Науменко В.А. Физико-технологические основы повышения стойкости штампового инструмента упрочнением высокоэнергетическими потоками // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 13–22. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-13-22

Physico-technological foundations of increasing the durability of die tools by hardening with high-energy flows

Valery A. Lebedev¹, PhD Eng.

Andrey N. Kochetov², PhD Eng.

Viktor A. Naumenko³, PhD student

^{1, 2, 3} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ va.lebedev@yandex.ru

² ankochetow@yandex.ru

³ viktor28021999@yandex.ru

Abstract. The issues of the formation of equilibrium conditions in ordered dislocation structures obtained by the action of highly concentrated electric energy fluxes and an informal (longitudinal-torsional) ultrasonic field on a conductive substrate material are viewed. The effect of solid surface films on deformation and fracture, being used as barriers and capable of suppressing the occurrence of new dislocations during metal deformation processes, is shown. The factors that determine to a greater extent the effectiveness of the film in creating a barrier for dislocations have been identified. A simplified analytical model of the interaction of a single dislocation with the layers obtained by the combined hardening method and the conditions for the equilibrium of dislocations in a film of a given thickness are proposed. The results of experimental studies of a hardened layer formed by anodizing with tungsten and copper on grade 20 steel are presented. They have shown that an increase in product strength occurs under conditions when the shear modulus of the base crystal is less than the shear modulus of the sawn layer, and the action force from this layer tends to push the dislocation away from the phase interface. As a result of the study of electroacoustic spraying effect on the quality and wear resistance of the surface of a die tool, it was confirmed that electroacoustic spraying, realizing a complex effect on metal, improves the quality of tool edges and their strength characteristics, forming a predictable organization of the surface layer structure; a "double barrier" created during electroacoustic spraying on the surface, preventing the release of dislocations on the surface is the main factor in increasing the strength properties of the tool. It was found that the coating applied by the electroacoustic method increases the service life by 1,5 – 2 times if compared to samples where surface was not treated by the above-mentioned method.

Keywords: dislocation structures, high-energy flows, reinforced layer, electroacoustic spraying, quality, wear resistance, form tool

For citation: Lebedev V.A., Kochetov A.N., Naumenko V.A. Physico-technological foundations of increasing the durability of die tools by hardening with high-energy flows / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 13–22 doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-13-22

Введение

Проблема увеличения ресурса работы формообразующего инструмента наиболее остро стоит как перед отечественным, так и зарубежным производителем машиностроительной продукции. Наиболее эффективное решение этой проблемы видится в использовании современных упрочняющих технологий, основанных на применении высококонцентрированных источников энергии и изменении физико-химических свойств материалов, обеспечивающих упорядочение дислокационных структур материалов.

Стоит отметить, что использование в процессе комбинированного упрочнения комплексного источника мощного ультразвукового поля можно назвать одним из наиболее перспективных направлений в формировании упорядоченных дислокационных структур. Данный метод получения износостойких защитных покрытий основан на комплексном взаимодействии высококонцентрированных источников электрической энергии и продольно-крутильного ультразвукового поля, при комбинированном методе упрочнения протекают достаточно сложные и неоднозначные физико-химические процессы, и явления,

поэтому возникает необходимость исследовать их более углубленно и детально.

Стимулирование развития научных и прикладных работ в данной области может произойти при получении упорядоченных дислокационных структур, путем использования комбинации воздействующих сил: электрическая искра и мощное сложное (продольно-крутильное) ультразвуковое поле в металлах.

Влияние твердых поверхностных пленок на деформацию и разрушение

Исследование учеными влияния твердых поверхностных пленок на изменения кристаллов, при воздействии нагрузки, началось с 1934 г., когда Росски, в результате своих наблюдений, отметил, что толщина окисной пленки менее двадцати атомных слоев может более чем на 50 % увеличить критическое напряжение сдвига монокристаллов кадмия. Многочисленные эксперименты, проведенные с использованием различных кристаллов-основ и поверхностных пленок (как окисных [1, 2], так и металлических [3]) подтвердили в большинстве случаев обнаруженный Росски эффект. Оказалось, также, что поверхностные пленки значительно уменьшают скорость

ползучести монокристаллов [4]. Характерно, что влияние поверхностной пленки проявляется уже на самых ранних стадиях деформации.

Смещение кривой напряжение – деформация в сторону более высоких напряжений невозможно объяснить на основании предположения о простом распределении нагрузки между кристаллом-основой и пленкой, так как вычисленная прочность пленки, необходимая для такого увеличения напряжения течения, невероятно велика. Следовательно, к изменению механических свойств кристалла, составляющего основу, приводит наличие поверхностной пленки.

В ходе нашего исследования, соответствующего имеющимся научным данным, было выявлено три механизма, способствующих упрочнению материалов. Первый механизм заключается в образовании поверхностного кристаллического слоя сплавов, который служит основой для последующего упрочнения. Второй механизм реализуется за счёт фиксации источников Франка-Рида на поверхности. Третий механизм, обладающий наибольшей научной ценностью, заключается в блокировке дислокаций, что затрудняет их выведение на поверхность кристаллической основы и значительным образом замедляет процессы скольжения.

Анализ кристаллических структур цинка с медными покрытиями продемонстрировал отсутствие значительного легирования внешнего слоя. Рентгенодифракционные эксперименты, проведенные на пленочных и непленочных образцах цинка, продемонстрировали максимальные деформации образцов, имеющих медную оболочку [5]. Это наблюдение даёт основание полагать, что пленка исполняет защитные функции, препятствуя выходу дислокаций на поверхность. Если бы медная пленка выступала в роли полноценного барьера для дислокаций, искажения в пленочных образцах должны были бы иметь меньшую величину. Тем не менее, с увеличением количества дислокаций, возникающих под пленкой, возрастает степень искажения в основном слое кристаллического образца. Эффект барьерного воздействия, осуществляемого покрытиями, дополнительно подтверждается измерениями внутренних трений цинковых образцов с

окисной пленкой [6]. Это явление не исчерпывается лишь блокировкой дислокационных источников на поверхности.

Следовательно, пленка, выступая в роли преграды, способна подавлять возникновение новых дислокаций в ходе деформационных процессов металлов.

Далее рассмотрим факторы, которые в большей степени определяют эффективность пленки в создании барьера для дислокаций.

Взаимодействие единичной дислокации с поверхностной пленкой

Дислокации, которые содержатся в твердом теле, значительно подвергаются влиянию, в границах разделов фаз, при наличии различных упругих свойств. Для того, чтобы добиться силы, которая будет стремиться изменить характер дислокаций, и, как следствие, повлиять на упругую энергию тела, необходимо придерживаться на поверхностях раздела фаз граничных условий. В случае, если оптимальные условия были достигнуты, можно существенно влиять на процессы создания упругих деформаций дислокациями.

Обратимся к исследованию условий взаимодействия полубесконечно толстой пленки с единственной дислокацией. Модуль сдвига, имеющийся у кристалла-основы, представим как G_1 , который будет расположен от границы раздела фаз ($0 < x < \infty$) справа. А модуль сдвига, имеющийся у «пленки», обозначим как G_2 и будет расположен от границы раздела ($-\infty < x < 0$) слева. Параллельно границе «пленка-кристалл», расположена бесконечная винтовая дислокация (рис. 1), где l – расстояние от границы в кристалле-основе, а b^2 (где b – вектор Бюргерса) является мощностью.

Для определения силы воздействия пленки на дислокацию следует провести сопоставление напряжения, создаваемого винтовой дислокацией в среде с изменяющимися упругими характеристиками, и модели линейного заряда в неоднородной среде, проанализированной в рамках электростатики. Данная аналогия была всесторонне изучена Эшелби.

При активном взаимодействии между двумя фазами считается, что в зоне раздела

величины напряжения остаются постоянными. (т.е. при $x = 0$).

Показать, что условия будут легко осуществимы [7], возможно, когда мы поместим дислокацию «изображения» мощностью Kb^2 , где $K = \frac{(G_2 - G_1)}{(G_2 + G_1)}$, в точку: $-l, 0$.

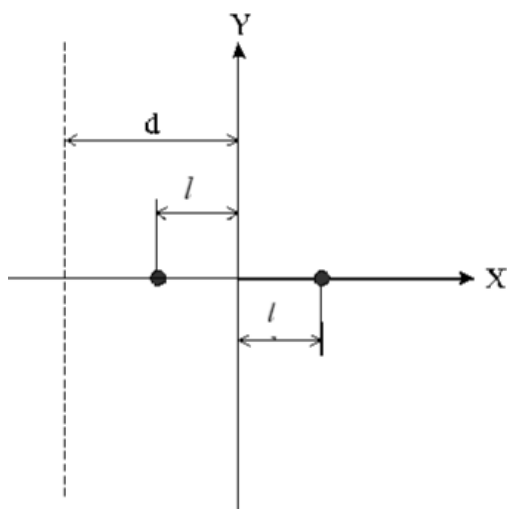


Рис. 1. Сила, действующая на дислокацию со стороны границы «пленка-кристалл»

Fig. 1. Force acting on dislocation from the film-crystal boundary

Изучение взаимодействия одной дислокации с отражённой в плоскости раздела дислокацией охватывает силу, воздействующую на обе структуры т.е.

где $\alpha = l/d$.

Если проанализировать формулу (2), можно установить, что всегда будет притягиваться к границе дислокация, когда пленка мягче, чем кристалл ($K < 0$). Если рассматривать противоположный случай, когда $K > 0$, то ситуация неоднозначная: дислокация будет притягиваться к пленке на больших расстояниях ($l \ll d, \alpha \ll 1$), на маленьких, наоборот, наблюдается отталкивание ($l \ll d, \alpha \ll 1$). Следовательно, на некотором расстоянии l_0 сила «изображения» равна

$$F = \frac{G_1 K b^2}{4l\pi}. \quad (1)$$

При достижении напряжением определённого уровня осуществляется движение дислокации в направлении границы $G_2 > G_1$, ($K > 0$). В случае несоответствия условий движения происходит отталкивание от границы $G_2 < G_1$, ($K < 0$). Следует отметить, что при более низкой жесткости пленки в наблюдаемых материалах дислокация проявляет притяжение к границе. При высоком уровне жесткости пленки при этом наблюдается отталкивание. Имеет также значение, что при соприкосновении кристаллической решётки с вакуумом дислокация демонстрирует притяжение, тогда как под влиянием напряжения может быть вытолкнута на поверхность ($G_2 = 0, K = -1$).

При исследовании пленки заданной толщины, обозначенной пунктирной линией на рис 1, акцентируем внимание на бесконечном ряде дислокаций, маркированный как $-l, -(l + 2d), -(l + 4d), -(l + 6d)$, и так далее, характеризующийся установленными мощностями и $K, -(1 - K^2), -(1 - K^2) \cdot K, -(1 - K^2) \cdot K^2, \dots$. Данная мера служит для поддержания граничных условий [7]. С целью анализа взаимодействия пленки с реальной дислокацией производится вычисление объединённого воздействия сил, возникающих от бесконечного ряда «изображающих» дислокаций, на реальную дислокацию.

$$F = \frac{G_1 K b^2}{4l\pi} \cdot \left\{ 1 - (1 - K^2) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} K^{n-1} \frac{\alpha}{\alpha + n} \right\}, \quad (2)$$

нулю, т.е. дислокация, находится в состоянии устойчивого равновесия, которое можно определить, приравняв нулю выражение (2).

Формулы, которые точно описывают взаимодействие краевой дислокации с границами раздела фаз, являются более сложными, чем для винтовой дислокации [8, 9]. Однако в случае «толстой пленки», приблизительно можно выразить формулой (1) силу взаимодействия краевой дислокации с границей. Максимальная ошибка при этом не превышает

15 % [7]. Точное решение для случая пленки конечной толщины [9, 10] позволяет определить положение равновесия краевой дислокации, которое оказывается ближе к границе, чем для винтовой дислокации. Это различие возрастает с увеличением отношения G_2/G_1 .

В предыдущем исследовании изучались модули сдвига на границе между кристаллом и пленкой. В данном случае не наблюдалось формирования соединений либо твердых растворов, а обнаруживался лишь разобобщенный слой. При этом модули сдвига демонстрировали однородные значения. В дальнейшем акцентируем внимание на двух других механизмах. В частности, существует вероятностное образование соединения на границе пленки с кристаллом, обладающего характерным значением модуля сдвига. При наличии растворимого компонента в пленке, переходящего к кристаллической фазе, диапазон модуля сдвига будет изменяться от G_1 до G_2 на всей границе раздела.

Упрощенная аналитическая модель взаимодействия единичной дислокации с полученными слоями методом комбинированного упрочнения

Современные исследования сосредоточены не на теоретических аспектах прочностных технологий, а на разработке практических методик и прогнозировании эксплуатационных характеристик покрытий, способствующих упрочнению конструктивных элементов.

Сложившаяся ситуация может приводить к непониманию процессов упрочнения, сопутствующих им явлений, вследствие необоснованного игнорирования глубоких исследований этих физических явлений с опорой на фундаментальные науки. Рассуждая о утилитарных и прагматичных взглядах, логично, что

акцент смещается на разработки прикладных вопросов, но стоит также отметить, что в использовании общих физических подходов, модельных представлений применительно к явлениям, которые сопутствуют процессам упрочнения, трения и изнашивания, имеются объективные трудности. Возникающие вопросы и проблемы по увеличению прочности материалов приходится решать на инженерном уровне из-за плохо развитого математического аппарата.

Объективно оценивать эффективность различных технологий упрочнения не представляется возможным, так как математические модели процессов упрочнения отсутствуют. Они, в свою очередь, могли бы учитывать стохастический характер протекания сопутствующих явлений.

Двойной барьер, который создается методом комбинированного упрочнения, препятствует выходу дислокаций на поверхность. Эффект, который обнаружил Росски, был подтвержден рядом экспериментов, которые были проведены с использованием различных кристаллов-основ и наносимых поверхностных слоев (окисных [1, 2], металлических [3]) и подтверждают вывод о барьерном механизме. На основании вышеизложенного материала предлагаем ознакомиться с упрощенной аналитической моделью взаимодействия единичной дислокации с получаемыми слоями методом комбинированного упрочнения (рис. 2).

Теперь проанализируем обстоятельства, при которых появляется соединение с модулем сдвига на границе между пленочным слоем и металлической основой.

Если ограничиться случаем «толстого слоя», то сила, действующая на дислокацию в металле со стороны промежуточного слоя толщиной d , имеющая модуль сдвига G_3 , равна

$$F_2 = \frac{G_1 \cdot b^2 \cdot K_{31}}{4l\pi} \cdot \left\{ 1 - (1 - K_{31}^2) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-K_{23}) \cdot K_{31}^{n+2} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + n} \right\}, \quad (3)$$

где $K_{ij} = (G_i - G_j)/(G_i + G_j)$.

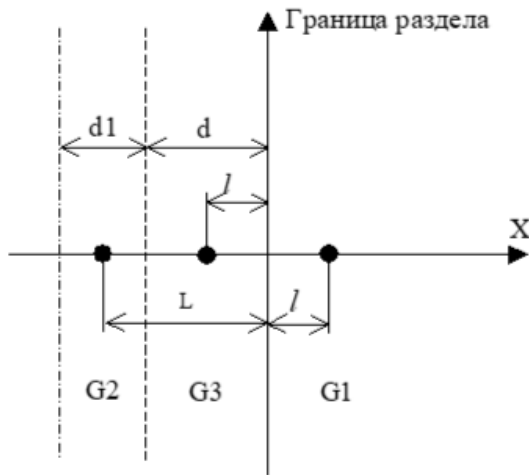


Рис. 2. Единичная дислокация вблизи границы раздела «напыленный слой-металл»:

G_1 – модуль сдвига материала упрочняемого образца
 G_2 – модуль сдвига напыленного слоя; G_3 – модуль сдвига пластически деформированного слоя; d – толщина пластически деформированного слоя; d_1 – толщина напыляемого слоя; l – расстояние от дислокации до границы раздела; L – расстояние от дислокации изображения напыленного слоя до границы раздела.

Fig. 2. A single dislocation near the "sprayed layer-metal" interface:

G_1 – the shear modulus of the material of the hardened sample; G_2 – the shear modulus of the sprayed layer; G_3 – the shear modulus of the plastically deformed layer; d – the thickness of the plastically deformed layer; d_1 – the thickness of the sprayed layer; l – the distance from the dislocation to the interface; L – the distance from the dislocation of the image of the sprayed layer to the interface.

В зависимости от соотношения модулей сдвига сила «изображения» имеет различный характер.

$$\frac{G_1 b}{2\pi} \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_j + x_i} + K \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_j - x_i} \right\} = \tau, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

где G_1 – модуль сдвига подложки; $K = (G_2 - G_1)/(G_2 + G_1)$; G_2 – модуль сдвига плёнки; b – модуль вектора Бюргерса; τ – напряжение.

Первая система уравнений представляет собой напряжение, действующее на дислокацию, расположенную в точке x_j , со стороны $n-1$ реальных дислокаций, находящихся в точках x_i , вторая – напряжение, обусловленное рядом n дислокаций изображения мощностью Kb^2 , размещенных в точках $-x_j$.

Используя принцип суперпозиции, можно говорить о том, что результирующая сила, действующая со стороны полученных слоев на дислокацию в металле, определяется как сумма сил, приложенных к ней:

$$\bar{F}_p = k\bar{F}_1 + \bar{F}_2, \quad (4)$$

где $k \approx l/L$.

Упорядоченные дислокационные структуры: условия равновесия

Перед тем как рассмотреть способы снижения напряжений, вызванных блокировкой слоя, необходимо проанализировать характер распределения данных напряжений, учитывающих толщину и жесткость пленки, сформированной комбинированным упрочнением.

Представим, что в кристаллической решетке n наблюдаются параллельные винтовые дислокации, расположенных на оси x в точках $x_1, x_2, \dots, x_n$. При приложении касательного напряжения τ к решетке дислокации начинают смещение в сторону границы фаз. Рассмотрим полубесконечное плоское пространство: дислокации в модели взаимодействуют с «изображениями», расположенными с противоположной стороны. В статическом равновесии силы, действующие на каждую дислокацию со стороны остальных, компенсируются внешними напряжениями [1]. Основываясь на изложенном материале, возможно сформулировать систему уравнений, позволяющую определять оптимальные расположения дислокаций.

С увеличением жесткости пленки равновесные положения дислокаций смещаются дальше от границы раздела фаз.

При наличии значительных величин n стандартные численные методы демонстрируют снижение эффективности. В подобной ситуации возможно применение приближенных методов, основанных на использовании непрерывно распределенных дислокаций [2]. Условие равновесия в этом контексте записывается следующим образом:

$$\int \frac{f(t)dt}{x-t} + K \int_0^L \frac{f(t)dt}{x+t} = \frac{2\pi\tau}{G_1b}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (6)$$

где L – площадь области сосредоточения; $f(t)$ – неустановившаяся функция распределения дислокаций.

Интеграл воспринимается как интеграл Коши. Решая интегральное уравнение (6), устанавливаем функцию распределения $f(t)$, нужную для вычисления числа дислокаций в скоплении и связанного с ним напряжения.

Количество дислокаций, а также их размещение внутри поликристаллических структур в значительной степени определяют процесс формирования полосы скольжения. При высокой степени точности величину возможно представить линейной зависимостью:

$$\left(\frac{2\pi\tau}{G_1b}\right) \cdot \frac{L}{n} \approx 2 + (\pi - 2) \cdot K. \quad (7)$$

Зависимость касательного напряжения на плоскости скольжения $y = 0$ в пленке от расстояния до границы для различных значений K (головная дислокация лежит на границе) представлена на рис. 1. Гомогенной среде соответствует значение $K = 0$, с увеличением жесткости пленки τ_{yz} падает.

Для случая пленки конечной толщины d , условие равновесия дислокаций запишется в следующем виде

Условия равновесия дислокаций в пленке заданной толщины d можно записать следующим образом:

$$\frac{G_1b}{2\pi} \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_j+x_i} + K \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_j+x_i} - \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(1-K^2) \cdot K^{v-2}}{x_j+x_i+2v d} \right] \right\} = \tau, \quad (8)$$

где $j = 1, 2, \dots, n$; v – коэффициент Пуассона.

Методика и результаты экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований применялась электронная микроскопия, в частности, с использованием РЭМ «Камебакс-микро». В процессе исследования использовались микрозонд, вторичные электроны и методы оценки поглощающего тока. Анализ среза упрочнённого слоя выявил неравномерное распределение химических элементов.

В ходе работы осуществлён анализ упрочнённого слоя, формирующегося при анодировании вольфрамом и медью на стали марки 20. Распределение компонентов в упрочнённом слое, образованном анодами из вольфрама и меди представлено на рис. 3. Исследование качества подтвердило неравномерное распределение элементов в слое, зависящее от его толщины.

В верхней области слоя и его стыковом участке с матрицей отмечается низкий уровень

железа, тогда как кобальт в основном обнаруживается в центральной области слоя. Добавки меди, хоть и в скромных объемах, выявляются на верхних поверхностях.

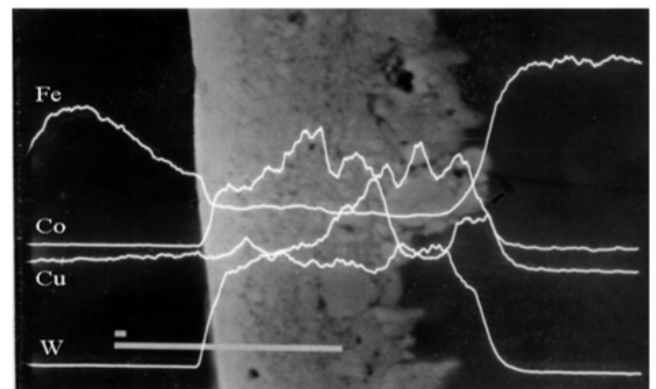


Рис. 3. Распределение элементного состава в напылённом слое (маркерная метка соответствует 10 мкм)

Fig. 3. The distribution of the element composition in the sprayed layer (the marker corresponds to 10 microns)

Опираясь на теоретические и экспериментальные данные воздействия поверхностных пленок G_2 / G_1 на расстановку дислокационных структур, возникновение которых связано с комбинированным упрочнением, можно сформулировать несколько заключений. Исследования свидетельствуют о том, что при увеличении коэффициента Пуассона схемы взаимодействия пленки и кристаллической решётки наблюдается снижение плотности краевых дислокаций. При этом с ростом модуля пленки при неизменном уровне приложения напряжения фиксируется сокращение количества дислокаций, сосредоточенных в определённых участках.

Следовательно, жёсткая оболочка препятствует образованию пластической деформации в кристаллических структурах, повышая их сопротивляемость внешним воздействиям по сравнению с кристаллами, не обладающими подобной защитой, при условии, что путь, пройденный дислокациями, сохраняет значительную длину.

Среди наиболее убедительных теорий объяснения упрочнения кристаллической структуры выделяется концепция поверхностных пленок. Эти пленки существенно влияют на процесс, ограничивая выход дислокаций на поверхности кристаллов. Они проникают в кристаллическую структуру и располагаются в строго заданной последовательности, значительно усложняя скольжение и приводя к упорядочиванию дислокационных структур.

Увеличение прочности наблюдается, когда модуль сдвига основного кристалла меньше модуля сдвига нанесенного слоя. В этом случае сила со стороны наложенного слоя сдерживает движение дислокаций к границе раздела фаз.

Увеличение прочности изделия происходит в условиях, когда модуль сдвига кристалла-основы меньше модуля сдвига напыленного слоя, и сила, действуя со стороны этого слоя, стремится оттолкнуть дислокацию от границы раздела фаз.

Экспериментальные исследования по влиянию процесса электроакустического напыления на качество и износостойкость

поверхности штампового инструмента проводились на образцах отработанных инструментов (рис. 4, 5).

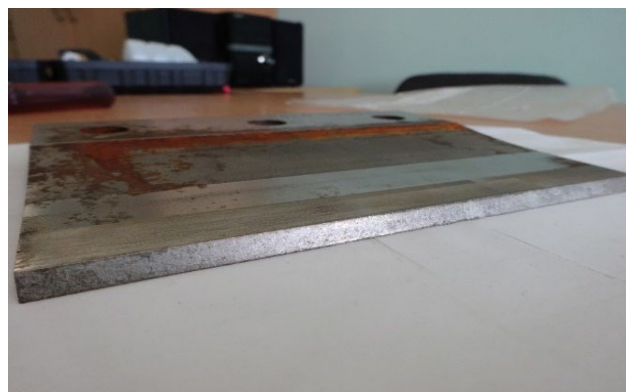


Рис. 4. Профиль ножа

Fig. 4. Knife profile

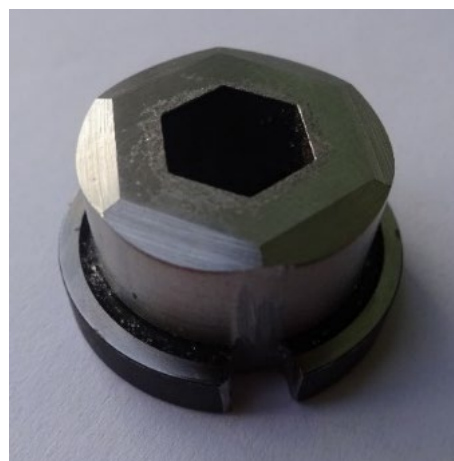


Рис. 5. Пуансон обрезной

Fig. 5. Trimming punch

Для нанесения электроакустического напыления использовалось разработанное в ДГТУ экспериментальное устройство. Образцы ножей и пуансонов были обработаны согласно матрице планирования эксперимента, для режимов напыления, где имелись, как максимальные, так и минимальные значения. Поверхности ножа были разбиты на четыре группы с различным изменением факторов. Для обеспечения максимальной эффективности упрочнения изделий напыление осуществлялось на переднюю и заднюю кромки образцов инструмента.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Электроакустическое напыление, реализуя сложное воздействие на металл, обеспечивает повышение качества кромок инструментов и их прочностных характеристик, формируя прогнозируемую организацию структуры поверхностного слоя.

2. Создаваемый, в процессе электроакустического напыления, на поверхности «двойной барьер», препятствующий выходу дислокаций на поверхность, является, основным фактором повышения прочностных свойств инструмента.

3. Изучение микроструктуры и фазового состава упрочненного слоя для всех режимов напыления выявило стойкую тенденцию к возникновению, как сжимающих микронапряжений второго рода, так и ОКР, вызванных измельчением блоков. При упрочнении подложки из высоколегированной стали анодом из твердого сплава получается слой с характерным послойным строением, отличающийся высокой дисперсностью аустенитного зерна и первичных карбидов, а также химическими соединениями на базе нитридов, оксидов, интерметаллидов, что в сочетании с высокой скоростью кристаллизации подтверждает выдвинутую нами теоретическую гипотезу «двойного барьера», препятствующего выходу дислокаций на поверхность.

4. Увеличение физического уширения пиков и их размытость, установленное на дифрактограммах при рентгеноструктурном анализе свидетельствуют об увеличении плотности дислокаций в подслое, что подтверждает выводы теоретической части.

Экспериментальные исследования получаемых характеристик качества поверхностного слоя, а именно микротвердости и шероховатости, позволили установить их зависимость от основных режимов напыления: напряжения, подводимого к электроду; амплитуды УЗК; усилия прижима и подачи. Установлено, что наиболее сильное влияние на микротвердость поверхностного слоя оказывает напряжение, подводимое к электроду, и амплитуда УЗК, а на шероховатость – амплитуда УЗК и подача:

Микротвердость получаемого поверхностного слоя возрастает в 1,5 – 4 раза в зависимости от режима обработки. Шероховатость остается без изменений, либо увеличивается незначительно в зависимости от режима обработки, при этом продольная и поперечная шероховатости одинаковы.

Проведенные экспериментальные исследования влияния оптимального режима напыления на основные механические характеристики позволили установить, что:

- нагрузка, соответствующая пределу текучести для напыленных образцов, увеличивается на 6,5 % по отношению к ненапыленным;
- нагрузка, соответствующая пределу прочности, увеличивается на 35,5 %;
- средняя относительная деформация после разрыва уменьшается на 12 %.

Выводы

Изменение основных механических характеристик подтверждает положительное влияние барьерно-дислокационного механизма упрочнения. Получены основные параметры изнашивания, позволяющие отнести детали, подвергнутые электроакустическому напылению, к восьмому классу износостойкости (по Крагельскому).

Установлено, что покрытие, нанесенное электроакустическим методом, увеличивает ресурс работы в 1,5 – 2 раза по отношению к образцам, поверхность которых не обрабатывалась выше упомянутым методом. Для обеспечения максимальной эффективности износостойкости для пунсонов необходимо дополнительно производить операцию притупления режущих кромок материала с последующим напылением износостойкого защитного покрытия методом электроакустического напыления с напряжением $U = 25$ В и амплитудой 6...10 мкм. Для ножей оптимальные режимы нанесения покрытия должны быть установлены: импульсное напряжение $U = 45$ В, амплитуда колебаний акустической системы 12...15 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andrade E.N. da C., Henderson C. Phil. Trans., 244A, 177, 1981.
2. Gilman J.J. Inst. Min. a. Metall. Engrs., 191, 1148, 1981.
3. Piskus M. P., Parker E.R. Trans. Amer. Inst. Min. a. Metall. Engrs., 191, 792, 1990.
4. Gilman J.J. Amer. Soc. Test. Mater., Spec. Techn. Publ. №171, 3, 1985.
5. Shapiro S., Read T.A. Phys. Rev., 82, 341, 1991.
6. Самарский А.А., Выбещевич П.Н. Вычислительная теплопередача., М., УРСС, 2003.
7. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М.; МИСИС, 2015.
8. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматлит, 2000.
9. Козаков А.Т., Зволинский А.С., Шмалько С.Г. Влияние режимов и времени легирования на толщину и химический состав покрытий при электронном легировании стали 20 сплавом ВК-8 // Электронная обработка материалов. № 2. 2018.
10. Быстрозакалённые металлические материалы. Материалы V международной конференции / под ред. Штиба С., Варлимонда Г., пер с англ. / под ред. Ковнеристого Ю.К., М.: Металлургия, 2009.

REFERENCES

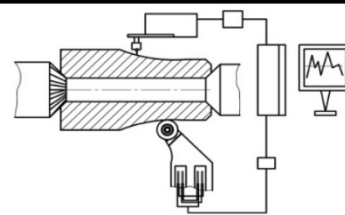
1. Andrade E.N. da C., Henderson C. Phil. Trans., 244A, 177, 1981.
2. Gilman J.J. Inst. Min. a. Metall. Engrs., 191, 1148, 1981.
3. Piskus M. P., Parker E.R. Trans. Amer. Inst. Min. a. Metall. Engrs., 191, 792, 1990.
4. Gilman J.J. Amer. Soc. Test. Mater., Spec. Techn. Publ. № 171, 3, 1985.
5. Shapiro S., Read T.A. Phys. Rev., 82, 341, 1991.
6. Samarskiy A.A., Vibeshevich P.N. Computational Heat transfer, Moscow, URSS, 2003.
7. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. Radiographic and electron-optical analysis. Moscow; MISIS, 2015.
8. Gusev A.I., Rempel A.A. Nanocrystalline materials. Moscow: Fizmatlit, 2000.
9. Kozakov A.T., Zvolinsky A.S., Shmalko S.G. Influence of alloying modes and times on the thickness and chemical composition of coatings during electronic alloying of steel 20 with VK-8 alloy. Electronic processing of materials. no. 2. 2018.
10. Fast-quenched metal materials. Proceedings of the V-th International Conference / ed. Shtiba S., Varlimonta G., translated from English/ ed. Kovneristogo Yu.K., Moscow: Metallurgiya, 2009.

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 20.04.2025; одобрена после рецензирования 27.04.2025; принята к публикации 14.05.2025.

The article was submitted 20.04.2025; approved after reviewing 27.04.2025; assepted for publication 14.05.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 23-31.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 23-31.

Научная статья
УДК 621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-23-31

Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации

Юлий Львович Чигиринский¹, д.т.н.

Дмитрий Вадимович Крайнев², к.т.н.

^{1, 2} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5620-5337>

² krainevdy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8762-4251>

Аннотация. На основе содержательного анализа понятия «неопределенность» и базовых понятий, и задач технологического проектирования и обеспечения машиностроительного производства построена классификация видов технологической информации в соответствии с видами и родами неопределенности. Определены виды технологической информации, наиболее значимо влияющие на формирование неопределенности различного рода. Обоснованы возможности и описаны информационные каналы, обеспечивающие эффективное управление неопределенностью технологической информации. Показано, что управляемое снижение неопределенности I, II и IV рода, применительно к процессу и результатам металлообрабатывающего производства, позволяет существенно снизить уровень неопределенности III рода – последствия принятых решений, что равнозначно повышению стабильности результатов производства. Эффективное управление неопределенностью II, IV и, частично, I рода, в цифровом производстве может быть реализовано за счет применения интеллектуальных технологических систем с адаптивным управлением, в том числе, самообучающихся.

Ключевые слова: неопределенность, информация, цифровое производство, технологическая подготовка, технологическое обеспечение, система адаптивного управления, интеллектуальная технологическая система

Для цитирования: Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В. Управление неопределенностью технологической информации в цифровом производстве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 23–31.
doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-23-31

Control of technological information ambiguity in digital production

Yuliy L. Chigirinsky¹, D.Eng.

Dmitry V. Krainev², PhD Eng.

^{1, 2} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru

² krainevdy@mail.ru

Abstract. Based on a meaningful analysis of the concept of "ambiguity" and basic concepts, as well as the tasks of technological design and support of machine-building production, a classification of types of technological information is constructed in accordance with the types and varieties of ambiguity. The types of technological information that most significantly

affect the formation of ambiguity of various kinds are identified. The possibilities are substantiated and the information channels providing effective ambiguity control of technological information are described. It is shown that the controlled reduction of ambiguity of the I-st, II-nd and IV-th, in relation to the process and results of metalworking production, can significantly reduce the level of ambiguity of the III-rd kind, these are implications of the decisions, and all this can be described as an equisignificant way to increase the stability of production results.

Keywords: ambiguity, information, digital production, process design, engineering support, adaptive control system, intelligent process systems

For citation: Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V. Control of technological information ambiguity in digital production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 23–31. doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-23-31

Базовые понятия

Неопределённость – гносеологическое понятие [1], выражающее взаимное несоответствие: между применяемым, «устоявшимся», понятийным аппаратом и новыми сущностями – «онтологическая» или «объективная» неопределённость; между некоторыми свойствами объекта и способами их субъективного отражения – «субъективная» неопределённость – определяется невозможностью объективной количественной оценки характерных свойств объекта исследования.

В зависимости от решаемых задач, неопределённость может рассматриваться: как оценка «качества» информации (достоверность, полнота и др.) или как мера информации о состоянии исследуемой системы относительно некоторых «идеальных» условий – в данном контексте «идеальность условий» соответствует полностью детерминированному знанию о функционировании технической системы – в реальных условиях, с учетом стохастического характера процессов, количественной оценкой неопределённости является вероятность получения ожидаемого результата; как отражение вариативности выбора из множества альтернатив; как источник и, в определенной степени, количественная мера риска; как ограничитель управляемости и стабильности технической системы.

Различают неопределённость среды (I рода), неопределённость принятия решений (II рода), неопределённость последствий принятых решений (III рода) и вариационную

неопределённость (IV рода). Именно неопределённость IV рода связана с постоянным изменением параметров и условий функционирования технических (и, в частности, технологических) систем. Традиционно, в задачах технологического проектирования чаще всего рассматривают именно неопределённость IV рода. Вместе с тем, на начальных стадиях технологической подготовки производства следует учитывать неопределённость II рода (неоднородность справочных данных [4]). При решении задач маршрутного проектирования и выбора последовательности перемены баз может возникать неопределённость III рода.

Технологическая информация [2] включает различные виды данных, которые связаны с технологическими процессами изготовления деталей и сборки машин. Основные виды технологической информации:

1. Базовая – данные, которые содержатся в конструкторской документации на изделие;
2. Руководящая – требования отраслевых стандартов к технологическим процессам и методам управления ими, а также стандарты к оборудованию и оснастке;
3. Справочная – материалы по выбору технологических нормативов (режимы обработки, припуски, нормы расхода материалов), технологическая документация опытного производства, описания прогрессивных методов изготовления и т.д.

Сопоставляя виды технологической информации с базовыми понятиями и видами неопределённости, можно сделать следующее (рис. 1) заключение.

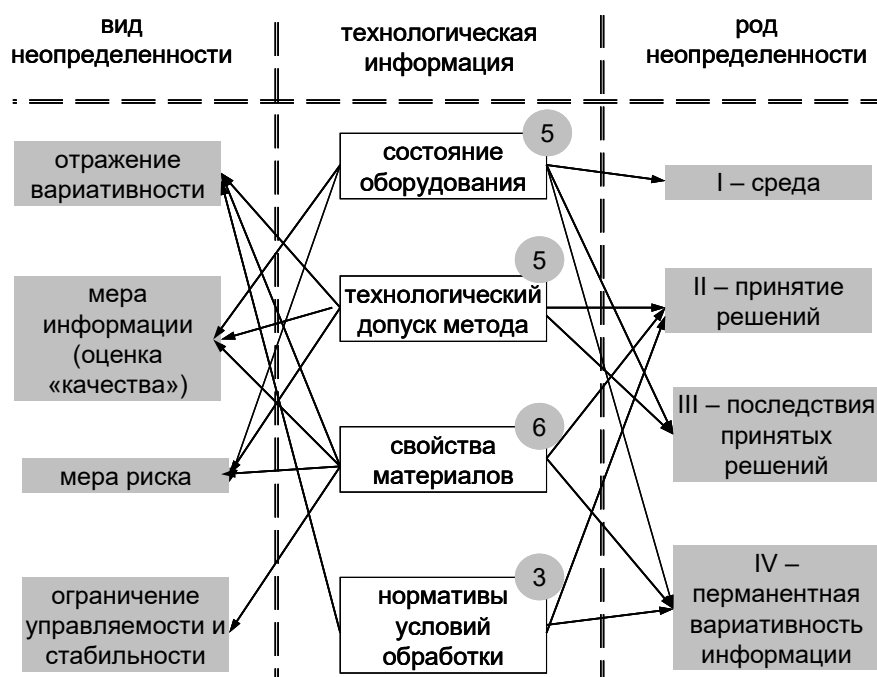


Рис. 1. Субъективная неопределенность технологической информации

Fig. 1. Subjective ambiguity of technological information

Числами на схеме (рис. 1) отмечено количество связей между элементами технологической информации и характеристиками понятия «неопределенность» [1]. Примем, что количество связей (по аналогии со «степенью» или «валентностью» вершины графа) определяет значимость элемента технологической информации. Тогда, наиболее значимыми, с точки зрения возможных рисков для производства, элементами технологической информации следует считать данные о характерных свойствах инструментальных и конструкционных материалов, сведения о состоянии оборудования и технологических возможностях методов обработки. Здесь же отметим, что неопределенность, применительно к информации и задачам технологической подготовки и обеспечения производства, носит субъективный характер, поскольку базовые понятия технологии являются устоявшимися.

Цифровое производство в машиностроении – это концепция подготовки, планирования и реализации производственных процессов, предполагающая использование единой информационной среды [3, 4]. Концепция цифрового производства подразумевает использование современных информационных технологий, в частности:

1. Цифрового моделирования – обработка процессов изготовления продукции на виртуальных моделях, включающих цифровые копии изделий, оборудования, технологических процессов;

2. Дополненной реальности [5] – наложение отображаемой компьютером информации на реальные объекты в процессе сборочного производства и логистических операций;

3. Промышленных интернет вещей [3];

4. Интеллектуальные технологические системы [6] – сбор, анализ и предоставление информации о состоянии технологических систем и процессах производства в режиме реального времени.

В числе преимуществ цифровизации машиностроительного производства называют:

1. Повышение уровня производительности труда и качества продукции;

2. Прогнозируемость результатов процессов производства и управления – снижение уровня неопределенности первого и третьего рода;

3. Снижение вероятных рисков за счет раннего обнаружения и своевременного устранения на этапе моделирования – снижение уровня неопределенности первого и третьего рода;

4. Снижение вероятных рисков за счет оперативного управления процессами на этапе производства – снижение уровня неопределенности второго и четвертого рода.

О неопределенности в технологии машиностроительного производства

Проблемы гарантированного обеспечения требуемого качества и точности изделий при обеспечении достаточной производительности обработки и работоспособности режущего инструмента являются важными для специалистов машиностроительного производства на протяжении всей истории науки об обработке металлов. Тематике назначения рациональных условий обработки посвящены исследования научных технологических школ, начиная от профессоров И.А. Тиме и К.А. Зворыкина и до настоящего времени [7 – 9]. Можно уверенно сказать, что существующие методы позволяют в той или иной мере приблизиться к рациональным или, иногда, оптимальным, условиям работы инструмента, но гарантированно

обеспечить эти условия при рассчитанных фиксированных режимах невозможно, поскольку сам процесс удаления стружки и формирования комплекса функциональных свойств поверхностного слоя изделия является нестационарным и имеет явно выраженный стохастический [10] характер. Решение задачи рационального назначения режимов условий обработки осложняется существенной вариативностью физико-механических, теплофизических свойств конструкционного и инструментального материалов [11]. Неопределённость является причиной того, что различие между расчетными и фактическими значениями выходных параметров достигает 20...30 % и более. Исследования, выполненные специалистами Волгоградской технологической научной школы [12] позволяет возможными причинами такой неопределенности считать особенности технологии производства материалов, используемых в производстве – несовершенства (рис. 2) и дефекты (рис. 3), возникающие при изготовлении, например, твердосплавного инструмента.

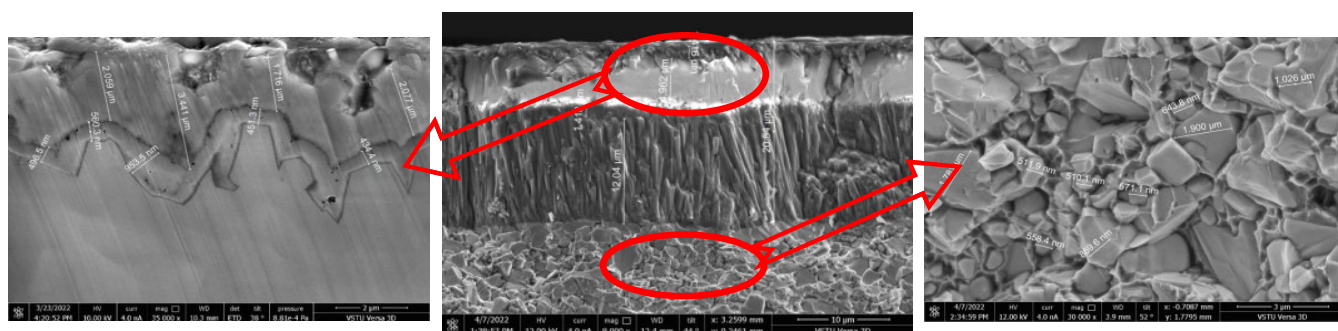


Рис. 2. Структура поверхностного слоя и матрицы твердосплавной многогранной пластины

Fig. 2. Structure of the surface layer and matrix of a carbide indexible insert

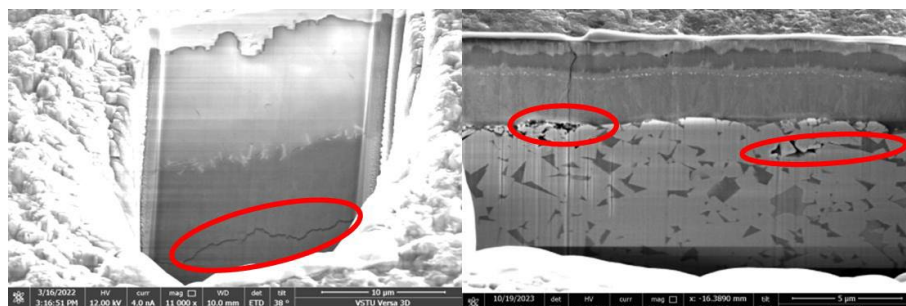


Рис. 3. Внутренние дефекты матрицы твердосплавной многогранной пластины

Fig. 3. Internal defects of the matrix of a carbide indexible insert

Определенный вклад в вариативность свойств инструментального материала, влияющих на эффективность процесса резания, вносит также и технология обработки поверхности (табл. 1, рис. 4) режущей пластины.

Очевидно, что изменение показателя Ra высоты микронеровностей рабочей

поверхности сменной многогранной твердосплавной пластины (СМП) в диапазоне $+15...+47\%$ среднего значения в расчете на отдельную СМП, или в диапазоне до $\pm 75\%$ среднего в пределах партии инструмента, существенно влияет на результаты обработки.

1. Вариативность среднего отклонения высоты микропрофиля Ra

1. Variability of the average deviation of the microprofile height Ra

Ra , мкм	Исследуемый образец			
	1	2	3	4
минимум	0,292	0,325	0,291	0,271
максимум	0,478	0,907	0,465	0,366
интервал	$0,385 \pm 24\%$	$0,616 \pm 47\%$	$0,378 \pm 23\%$	$0,319 \pm 15\%$

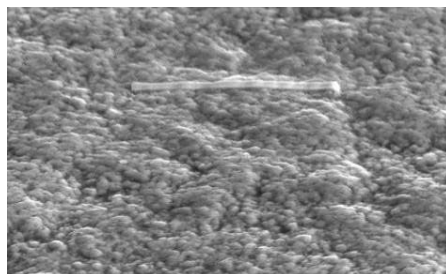


Рис. 4. Морфология поверхности СМП

Fig. 4. Morphology of the indexible insert surface

Существующие методы контроля свойств (табл. 2) материалов контактной пары «инструмент-заготовка» позволяют без

разрушения исследуемых образцов оценить параметры твердости поверхности.

2. Методы контроля свойств элементов технологической системы

2. Testing methods of technological system elements properties

Свойства материала	Методы контроля	
	Разрушающий	Неразрушающий
Заготовка		
Твердость	+	+
Микротвердость	+	—
Прочность	+	—
Теплопроводность	+	—
Инструмент		
Твердость	+	+
Микротвердость	+	+
Прочность	+	—
Стойкость к абразивному износу	+	—
Температуро- и красностойкость	+	—

Однако известно, что наиболее значимыми с точки зрения формирования комплекса свойств обработанной поверхности и изнашивания режущего инструмента, являются

теплофизические свойства материалов, в особенности при высоких скоростях резания. Оценка эффективности процесса резания на основе электро- и теплофизических свойств [12]

только инструментального материала характеризуется невысокой достоверностью. Так как результаты обработки – свойства поверхностного слоя, точность размеров и формы обработанной поверхности, закономерности изнашивания инструмента, формируются при взаимодействии инструментального и конструкционного материалов, то и оценка эффективности процесса должна выполняться комплексно, с учетом сочетания свойств материалов контактной пары «инструмент – заготовка».

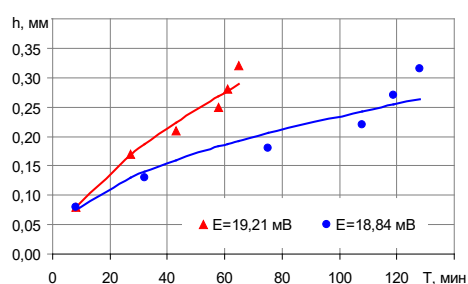
В качестве оценочного показателя работоспособности режущего инструмента, учитывающего комплекс свойств инструментального и конструкционного материалов принята, величина термоЭДС пробного рабочего хода. Поскольку величина показателя определяется при

фиксированных режимах [12] обработки, не зависящих от группы применимости твердого сплава и марки конструкционного материала, результаты контроля можно сравнивать для различных сочетаний материалов. Условия проведения стойкостных испытаний твердосплавного инструмента с многослойными износостойкими покрытиями для различных условий обработки приведены в табл. 3. В результате проведенных испытаний доказано, что величину термоЭДС пробного рабочего хода можно рассматривать в качестве комплексного показателя работоспособности твердосплавного инструмента, в том числе инструмента с многослойными износостойкими покрытиями.

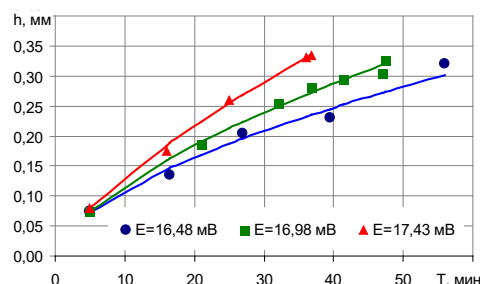
3. Условия проведения стойкостных испытаний

3. Conditions for conducting resistance tests

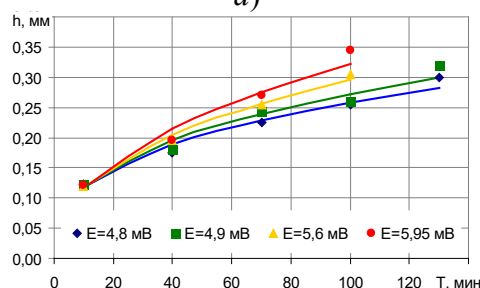
Материал заготовки	Инструмент (группа применимости)	Подача, мм/об	Скорость, м/мин	Диапазон термоЭДС, мВ	Рис. 5
40X13	Korloy WNMG 080408 MM NC9125 (M)	0,2	155	18,84...19,21	(a)
08X21H6M2T	Korloy WNMG 080408-VP2 UNC805 (S)	0,3	80	16,48...17,43	(б)
40X	Sandvik Coromant WNMG 080408 PM 4425 (P)	0,1	280	4,80...5,95	(в)
20X13	Sandvik Coromant WNMG 080408-MM 2220 (M)	0,1	210	11,60...13,90	(г)



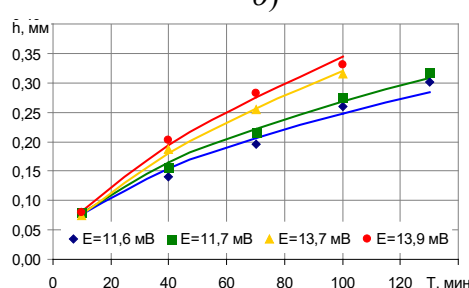
a)



б)



в)



г)

Рис. 5. Интенсивность изнашивания твердосплавного инструмента в зависимости от термоЭДС пробного рабочего хода

Fig. 5. The wear rate of the carbide tool depending on the thermal efficiency of the test stroke

Величина термоЭДС пробного рабочего хода: может быть измерена непосредственно в процессе обработки; не требует разрушения исследуемых образцов; обладает достаточно высокой чувствительностью к интенсивности изнашивания режущего инструмента – увеличение интенсивности изнашивания СМП в 1,4 – 1,9 раза отражается на изменении термоЭДС в пределах 1,0...1,6 мВ, т.е., не более чем на 7...10 %.

Следовательно, можно говорить о возможности применения этого показателя в качестве проактивного критерия работоспособности режущего инструмента на стадии подготовки производства и для оперативной диагностики сочетания материалов контактной пары «инструмент-заготовка» для коррекции предварительно назначенных режимов обработки.

В условиях развивающейся цифровизации металлообрабатывающего производства следует говорить не просто об оценке состояния отдельных элементов технологической системы. Полноценное цифровое производство, соответствующее положениям концепции Industry 4.0, предполагает существенное снижение [3] участия и влияния «человеческого фактора» в общей системе управления производственными

процессами и частичную передачу функций принятия решений кибернетической подсистеме интеллектуальной [6] технологической системы. Возможность «интеллектуализации» технологических систем базируется на построении систем диагностики, идентификации и управления технологическими системами за применения комплексных критериев и методов искусственного интеллекта [10, 13].

Влияние начальной неопределенности II и IV рода (рис. 1), отягощенное стохастическим характером процессов формирования комплекса показателей качества обработки (неопределенность IV рода) и изменением состояния оборудования и инструмента (неопределенность I рода), приводит к формированию неопределенности III рода. Специалисты ведущих технологических научных школ России [4, 9 – 11, 14, 15] обосновывают возможность снижения случайных воздействий на результат производства (неопределенность III рода) за счет применения систем адаптивного управления, в частности, самообучающихся [14] и систем, учитывающих стохастический характер изменения производственной ситуации [15], обеспечивающих динамическое управление неопределенностью I рода.

4. Функциональная схема управления неопределенностью

4. Operating diagram of ambiguity control

Этап	Содержание
1. Тарирование режущих пластин	Оценка однородности свойств СМП в рамках партии поставки. Группирование СМП с учетом установленных надежности и уровня неопределенности технологической информации.
2. Предварительное назначение режимов резания	Выбор и назначение режимов резания в соответствии с нормативными рекомендациями.
3. Оценка свойств контактной пары	Оценка свойств контактной пары в режиме пробного прохода с целью нивелирования неопределенности технологической информации.
4. Корректировка предварительных режимов резания	Коррекция режимов обработки по результатам оценки свойств материалов контактной пары и в соответствии с технологической задачей
5. Тензометрический мониторинг процесса	Оценка силовой напряженности процесса резания, вида контактного взаимодействия и динамической неустойчивости процесса обработки. Адаптивное управление в соответствии с задачами технологической операции
6. Вибрационный мониторинг процесса	Оценка неустойчивости динамики процесса резания, корректировка режимов обработки в соответствии с установленными граничными условиями. Предиктивная аналитика стабильности условий и обеспечения требуемых результатов обработки
<i>Примечание.</i> Этапы 5 и 6 выполняются непрерывно на протяжении всего технологического перехода; если результаты тензометрического и (или) вибрационного мониторинга неудовлетворительны, то выполняется возврат к этапу 4.	

В качестве перспективных информационных каналов, обеспечивающих достаточно эффективный мониторинг (табл. 3) состояния элементов технологической системы в процессе обработки, исследователи называют вибрационный [8 – 10, 12, 14] и динамический (тензометрический, силовой) [7, 9, 11, 12, 14] сигналы.

Заключение

Неоднозначность исходных данных, методов и результатов решения задач технологической подготовки и обеспечения машиностроительного производства определяется неопределенностью исходной и оперативной информации. Наиболее существенное влияние на комплексный результат производства оказывает неопределенность I, II, III рода. Эффективное управление неопределенностью II, IV и, частично, I рода, в цифровом производстве может быть реализовано за счет применения интеллектуальных технологических систем с адаптивным управлением, в том числе, самообучающихся. Эффективное управление неопределенностью II и III рода реализуется на этапе проектирования технологических операций, за счет предварительной диагностики, и на начальном этапе обработки, за счет оперативной комплексной диагностики свойств материалов контактной пары «инструмент-заготовка». Эффективное управление неопределенностью I и II рода может быть реализовано на начальных этапах технологической подготовки производства – при маршрутном проектировании, и непосредственно в ходе производства, за счет оперативного управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорожкин А.М., Соколова О.И. Понятие "неопределённость" в современной науке и философии // Вестник Вятского гуманитарного университета, 2015. № 12. С. 5–12. EDN: VKAXZZ.
2. Терминологический словарь автоматизации строительства и производственных процессов [Электронный ресурс]. URL: <http://slovar-avt.ru> (дата обращения: 14.03.2025). DOI: 10.34660/c0727-6092-6372-a
3. Ингеманссон А.Р. Технологические составляющие цифровизации производственного

процесса на машиностроительном предприятии // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 41–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-41-48. EDN PDJLDO.

4. Чигиринский Ю.Л. Трансформация информационной структуры как инструмент повышения эффективности многономенклатурного производства / Ю.Л. Чигиринский, Д.В. Крайнев, Ж.С. Тихонова // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 4(154). С. 29–40. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-4-29-40. EDN EIXHSQ.

5. Леон К.С., Калачев О.Н. Применение дополненной реальности в сборочных процессах машиностроения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. Т. 23, № 8. С. 346–349. DOI: 10.36652/0202-3350-2022-23-8-346-349.

6. Чигиринский Ю.Л. Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства / Ю.Л. Чигиринский // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 8 (110). С. 29–35

7. Снегирева К.К. Улучшение обрабатываемости инструментальных сталей резанием посредством управления свойствами обрабатываемого материала / К.К. Снегирева, С.А. Тараканов // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2021. № 4 (37). С. 52–58.

8. Кузнецова Е.М. Разработка экспертной системы технологического обеспечения требуемой шероховатости при обработке закаленных сталей на станках с ЧПУ / Е.М. Кузнецова, В.Е. Овсянников, Р.Ю. Некрасов, У.С. Путилова // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 418–426.

9. Остапчук А.К. Адаптивное управление чистовой токарной обработкой деталей транспортных машин на станках с ЧПУ / А.К. Остапчук, Е.М. Кузнецова / Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2019. Т.1. С. 98–103.

10. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Бровкова М.Б. Создание и развитие высоконадежных информационно-управляющих систем с элементами искусственного интеллекта для перспективных технологических комплексов // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 32–42.

11. Унянин А.Н. Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации с учетом изменения параметров процесса обработки / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24. № 3 (107). С. 63–68.

12. Крайнев Д.В., Тихонова Ж.С., Рогачев А.В., Нилидин Д.А., Чигиринская Н.В. Возможность оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с покрытием по теплофизическим свойствам // Современные научные технологии. 2024. № 5. С. 64–70; DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.40006>.

13. Маслов Д.А. Модель для оценки износа режущего инструмента на основе искусственного интеллекта / Д.А. Маслов, В.Е. Овсянников, Г.Н. Шпитко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. 2023, № 3 (274). С. 27–30. DOI: 10.35211/1990-5297-2023-3-274-27-30

14. Суслов А.Г., Медведев Д.А., Петрешин Д.И., Федонин О.Н. Система автоматизированного

технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 5. С. 40–44.

15. Решетникова Е.П. Формализация выбора контрольно-измерительных средств для оценки размерных характеристик деталей со сложнопрофильными поверхностями при разработке технологических процессов / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017, № 9 (204). С. 135–137.

REFERENCES

1. Dorozhkin A.M., Sokolova O.I. The concept of "uncertainty" in modern science and philosophy // Bulletin of Vyatka State Humanitarian University, 2015, no. 12, pp. 5–12. EDN: VKAXZZ.

2. Terminological dictionary of automation of construction automation and production processes [Electronic resource]. URL: <http://slovar-avt.ru> (date of access: 03/14/2025). DOI: 10.34660/c0727-6092-6372-a

3. Ingemansson A.R. Engineering process aspects of digitalization of machine-building production // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, no. 8 (158). pp. 41–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-41-48. EDN PDJLDO.

4. Chigirinsky Yu.L. Transformation of the information structure as a tool for efficiency increase in high-variety production / Yu.L. Chigirinsky, D.V. Krainev, Zh.S. Tikhonova // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, n. 4 (154). pp. 29–40. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-4-29-40. EDN EIXHSQ.

5. Leon K.S., Kalachev O.N. The use of augmented reality in the assembly processes of mechanical engineering // Assembling in mechanical engineering, instrument-making. 2022, vol. 23, no. 8, pp. 346–349. DOI: 10.36652/02-3350-2022-23-8-346-349.

6. Chigirinsky Yu.L. Current state and trends in development of technological engineering pre-production of machinery production / Yu.L. Chigirinsky // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, no. 8 (110), pp. 29–35

7. Snegireva K.K. Improvement of machinability of tool steels by cutting by controlling the properties of the processed material / K.K. Snegireva, S.A. Tarakanov //

Resource-saving technologies of production and forming materials in mechanical engineering. 2021, no. 4 (37), pp. 52–58.

8. Kuznetsova E. M., Ovsyannikov V. E., Nekrasov R. Y., Putilova U. S. Development of an expert system for technological support of required roughness when machining hardened steel parts on numerically controlled machines. Polytech Journal. 2024, vol. 28, no.3, pp. 418–426.

9. Ostapchuk A.K. Adaptive process control system of fine turning of parts of transport machines on CNC machines / A.K. Ostapchuk, E.M. Kuznetsova / Modernization and scientific research in the transport sector. 2019, vol.1, pp. 98–103.

10. Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Brovkova M.B. Creation and development of highly reliable information and control systems with elements of artificial intelligence for advanced technological complexes // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, no. 7 (157), pp. 32–42.

11. Unyanin A.N. Correction of the turning mode under conditions of uncertainty of technological information, taking into account changes in machining parameters / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2022, vol. 24, no. 3 (107), pp. 63–68.

12. Krainev D.V., Tikhonova Zh.S., Rogachev A.V., Nikitin D.A., Chigirinskaya N.V. The possibility of evaluating the cutting properties of a coated carbide tool by thermophysical properties // Modern science-intensive technologies. 2024, no. 5, pp. 64–70; DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.40006>.

13. Maslov D.A., Ovsyannikov V.E., Shpitko G.N. Model for assessing the wear of a cutting tool based on artificial intelligence. // Izvestiya VolgSTU. Iss. Advanced technologies in mechanical engineering. 2023, no. 3 (274). pp. 27–30. DOI: 10.35211/1990-5297-2023-3-274-27-30

14. Suslov A.G., Medvedev D.A., Petreshin D.I., Fedonin O.N. Automated technological system to ensure contact stiffness of machine parts // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2018, no. 5, pp. 40–44.

15. Reshetnikova E.P. Formalization of the choice of control and measuring instruments for assessing the dimensional characteristics of parts with complex surfaces in the development of process industries/ E.P. Reshetnikova, P.Y. Bochkarev // Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2017, no. 9 (204), pp. 135–137.

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 28.04.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 28.04.2025; approved after reviewing 14.05.2025; assepted for publication 19.05.2025.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 32-38.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 32-38.

Научная статья

УДК 621.01

doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-32-38

Алгоритм технологии изготовления сложных сборных изделий с использованием цифровых измерительных и обрабатывающих систем

Борис Анатольевич Якимович, д.т.н.

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия,
yakimovich52@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Современное машиностроительное производство находится в стадии фундаментального переосмысления и радикального перепроектирования конструкторских и технологических этапов, с целью достижения коренных улучшений наиболее важных показателей его деятельности – стоимость, качество и производительность. Цель исследования работы – анализ современных методов реверс-инжиниринга с учётом непрерывного развития цифровых технологий проектирования, изготовления и сборки машиностроительных изделий. Создание эффективного алгоритма технологии изготовления и сборки сложных сопрягаемых деталей. В статье представлена усовершенствованная технология изготовления и сборки изделий машиностроения, использующая методы реверс-инжиниринга. Выполнен анализ успешно решенных задач с использованием реверс-инжиниринга в различных сферах практической деятельности. Показано, что дальнейшее развитие современных методов цифрового проектирования и конструирования сложных изделий машиностроения и разработки оптимальных технологий их изготовления, требует переосмысления целей, задач и возможности использования реверс-инжиниринга при создании эффективных технологий. Впервые предложен алгоритм технологии изготовления деталей сложных сборочных изделий, основанный на принципах реверс-инжиниринга с использованием цифровых измерительных и обрабатывающих высокотехнологичных систем. Разработанный алгоритм защищён изобретением к патенту, как способ изготовления сборного изделия. Проанализирована проблема защиты от копирования конкурентоспособной продукции машиностроения. Рассмотрены различные способы защиты от копирования изделий получаемых с использованием современных методов реверс-инжиниринга. Разработанный способ позволяет значительно сократить количество технологических операций, требуемых для изготовления второй детали, за счёт внедрения одной контрольной операции для первой детали, при выполнении которой осуществляется измерение элементов сопряжения первой детали и создаётся компьютерная модель второй детали, с учётом проведённых измерений и выполнение четырёх операций механической обработки на станке с ЧПУ.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, цифровая модель детали, сложные сборочные изделия, виртуальное производство, методы защиты от копирования, эффективные технологии проектирования, измерения и изготовления

Для цитирования: Якимович Б.А. Алгоритм технологии изготовления сложных сборных изделий с использованием цифровых измерительных и обрабатывающих систем // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 32–38. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-32-38

Algorithm of manufacturing technology for complex assembled products using digital measuring and processing systems

Boris A. Yakimovich, D.Eng.

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
yakimovich52@gmail.com

Abstract. Modern machine-building production is being radically reinterpreted and redesigned in technological stages and total restructuring for fundamental improvements in the most important significatives of its activities - cost, quality and productivity. The purpose of the research is to analyze modern methods of reverse engineering, taking into account the continuous development of digital technologies for designing, manufacturing and assembling machine-building products. It is effective algorithmization that can be useful for manufacturing and assembling complex mating parts. The article presents an improved technology for manufacturing and assembling machine-building products using reverse engineering methods. The analysis of successfully solved tasks using reverse engineering in various fields of practical activity is carried out. It is shown that the further development of modern methods of digital design and construction of complex mechanical engineering products and the development of optimal manufacturing technologies requires some rethinking of the goals and objectives. There should be a possibility of using reverse engineering for making effective technologies. For the first time, an algorithm for manufacturing parts of complex assembly products based on the principles of reverse engineering using digital measuring and high-tech processing systems has been proposed. The developed algorithm is protected by the patent application as a method of manufacturing an assembled product. Duplication protection problem in case of competitive machine-building products is analyzed. Various methods of protection against duplication of products obtained through modern techniques of reverse engineering are viewed. The developed method makes it possible to reduce significantly the number of technological operations required for the manufacture of the second part by introducing one control operation for the first part, during which the coupling elements of the first part are measured and a computer model of the second part is created, taking into account the all performed measurements and four machining operations on a CNC machine.

Keywords: reverse engineering, digital model of a part, complex assembly products, virtual production, duplication protection methods, effective design, measurement and manufacturing technologies

For citation: Yakimovich B.A. Algorithm of manufacturing technology for complex assembled products using digital measuring and processing systems / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 32–38. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-32-38

Введение

Современное машиностроительное производство находится в стадии фундаментального переосмысления и радикального перепроектирования конструкторских и технологических этапов, с целью достижения коренных улучшений наиболее важных показателей его деятельности – стоимость, качество и производительность.

Цель исследования работы – анализ современных методов реверс-инжиниринга с учётом непрерывного развития цифровых технологий проектирования, изготовления и сборки машиностроительных изделий. Создание эффективного алгоритма технологии изготовления и сборки сложных сопрягаемых деталей.

Реверс-инжиниринг получил своё развитие в различных сферах человеческой деятельности [1]. Суть его заключается в том, что, когда лидеры различных профессий используют реверс-инжиниринг к результатам выдающегося (чужого, уже полученного) труда, чтобы извлечь и формализовать скрытые идеи, сформировать новые компетенции в области творчества и креативности. От более общего понятия реверс-инжиниринга постараемся проанализировать его использование в

технике. А если конкретнее, в машиностроительной отрасли. В многочисленных работах, посвящённых реверс-инжинирингу в машиностроении, даются различные его понятия и определения [2 – 6]. В рамках настоящей работы, рациональным, на наш взгляд будет следующее определение реверс-инжиниринга: реверс-инжиниринг – процесс копирования одной из сопрягаемых деталей машиностроительного изделия, получение 3D-модели второй сопрягаемой детали, изготавливаемой на оборудование с числовым программным управлением, с целью снижения затрат на изготовление сложных машиностроительных изделий. Данный подход применим и в том случае, когда в изделии могут быть и более двух сопрягаемых деталей.

При реализации разработанного алгоритма актуальной является задача определения первой и последующих сопрягаемых деталей. Критерием здесь безусловно являются затраты на их изготовление. Чем выше трудоёмкость изготовления деталей и стоимость норма/часа работы оборудования, тем рациональнее вероятность выбора в качестве первой сопрягаемой детали, имевшей наибольшие затраты.

Проблема выбора первой сопрягаемой детали по величине затрат заключается в том, что при определении их традиционными

методами (отраслевые нормативы, типовые технологические процессы, хронометраж) требуется разработка технологических процессов. В нашем случае это практически не реализуемо. Приемлемым способом является использование методов прогнозного нормирования (определение трудоёмкости методом аналогий, экспертного оценивания, метод оценки конструктивно-технологической сложности) [7]. Наиболее приемлемым с точки зрения цифровизации и автоматизации (включение в виде отдельного модуля в CAD/CAM/CAE системы) является метод оценки трудоёмкости с использованием конструктивно-технологической сложности отдельных деталей и машиностроительного изделия в целом [8]. Блок-схема обобщённого алгоритма основных вычислительных процедур метода конструктивно-технологической сложности показана на рисунке 1.

Вопросы повышения эффективности изготовления и сборки изделий машиностроения

содержательно рассмотрены в классической работе по технологии машиностроения [9]. В условиях массового, крупносерийного и серийного производств, при сборке изделий как правило используется методы, обеспечивающие полную взаимозаменяемость. Данный способ обеспечивает качественную сборку при соединении любых сопрягаемых деталей из всей партии. При этом допуск замыкающего звена рассчитывают по максимальным значениям допуска размеров всех составляющих звеньев. Использование метода полной взаимозаменяемости, особенно для сложных и высокоточных сборочных изделий приводит к резкому удорожанию производимой продукции из-за необходимости назначения жёстких допусков на размеры составляющих звеньев. Введение технологических операций пригонки или подгонки позволяют увеличить допуски на размеры деталей образующих размерную цепь (способ неполной взаимозаменяемости) [10, 11].

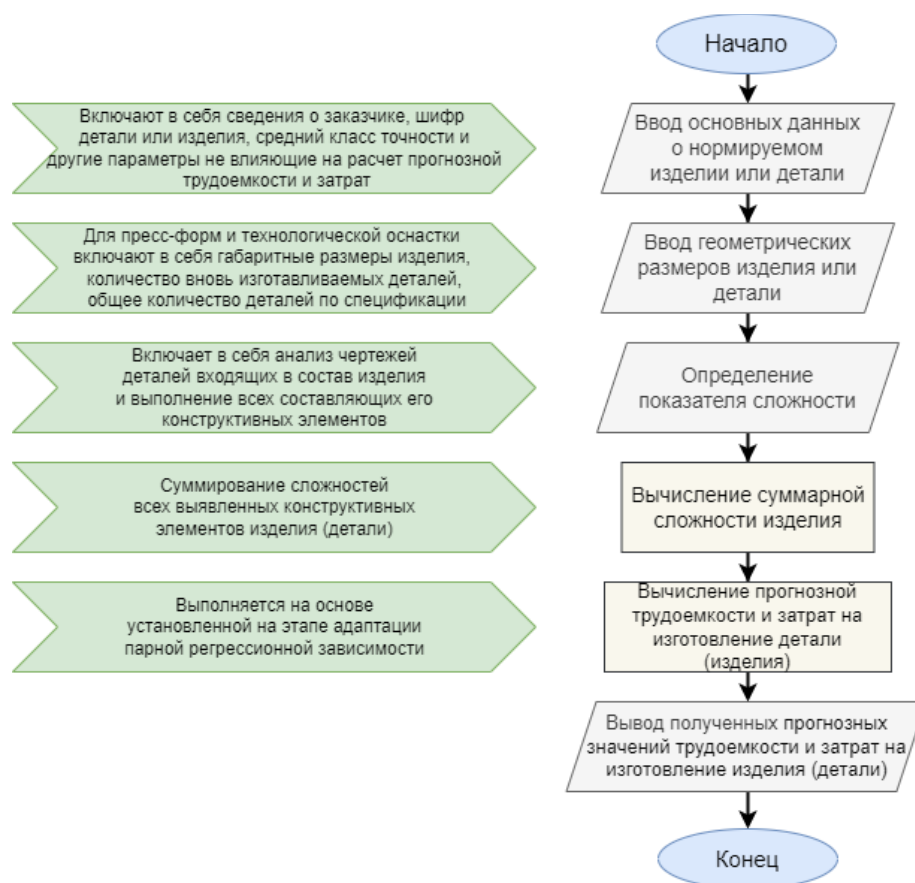


Рис. 1. Блок-схема обобщенного алгоритма основных вычислительных процедур при определении показателя сложности

Fig. 1. Block diagram of the generalized algorithm of the main computational procedures for determining the complexity index

Способ неполной взаимозаменяемости имеет существенные недостатки тех случаев, когда требуется обеспечить точность размеров и качество сопряжения одновременно по нескольким поверхностям. Затраты на изготовление изделий с применением способа неполной взаимозаменяемости значительно возрастают из-за введения дополнительных контрольных операций.

Разработанный и внедрённый на ряде промышленных предприятий алгоритм рациональной технологии изготовления сложных

сборных изделий с использованием метода реверс-инжиниринга представлен на рис. 2 [12].

Реализацию алгоритма рассмотрим на примере сборочной единицы, состоящей из двух сложных деталей (рис. 3, рис. 4). Исходя из оценки метода конструктивно-технологической сложности более трудоёмкой является деталь, изображённая на рис. 3.

Укрупнённый технологический процесс с использованием способа неполной взаимозаменяемости представлен в табл. 1.

1. Технологический процесс с использованием способа неполной взаимозаменяемости

1. Flow process using the method of incomplete interchangeability

№ п/п	Перечень операций	Значение
1	Изготовление первой детали суммарной трудоёмкостью операций механической обработки	300 мин
2	Контроль параметров первой детали	12 мин
3	Изготовление второй детали суммарной трудоёмкостью	72 мин
4	Контроль второй детали трудоёмкостью КД2	6 мин
5	Операция слесарной пригонки второй детали СД2	30 мин

Типового структура технологического процесса изготовления второй детали

представлен на рис. 5. Он обеспечил выполнение требований, представленных в таб. 2.

2. Обеспечение технических требований ко второй детали

2. Technical requirements for the second part

№ п/п	Технические требования	Значения
1	Наименьшая шероховатость, Ra	6,3 мкм
2	Допуск перпендикулярности	0,05 мм
3	Плоскостность	0,2 мм
4	Симметричность	0,025 мм
5	Допуск по контуру	0,2 мм

Разработанный способ позволяет значительно сократить количество технологических операций, требуемых для изготовления второй детали, за счёт внедрения одной контрольной операции для первой детали, при выполнении которой осуществляется измерение элементов сопряжения первой детали и создаётся компьютерная модель второй детали, с учётом проведённых измерений и выполнение четырёх

операций механической обработки на станке с ЧПУ.

В приведённом примере трудоёмкость изготовления второй детали была снижена в два раза, а себестоимость её изготовления уменьшена на 30 %. В расчётах не учтено снижение затрат на изготовление первой детали вследствие предъявление менее жёстких требований к точности её размеров.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма основных вычислительных процедур предлагаемого способа изготовления сборного изделия

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for the main computational procedures of the proposed manufacturing technique of an assembled product

Активное развитие методов реверс-инжиниринга, с целью копирования и изготовления передовых конкурентоспособных технических решений определило необходимость создания комплекса мер противодействия. Коротко остановимся на трёх подходах: технологическом, эволюционном и сетевом. Первый подход заключается в разработке и реализации технологии недоступной конкурентом. Достижение уникальности, высокого качества и производительности путем технологического

превосходства требует высокой стоимости на реализацию высоких технологий и подготовленного персонала. Эволюционный подход основан на непрерывных усовершенствованиях выпускаемого продукта. Прежде всего в усложнении конструкции или добавления новых функций. Если ведётся сетевое проектирование, то с целью исключения копирования часть продуктов (сервисное) выполняется недоступной, в отличие от аппаратной части.

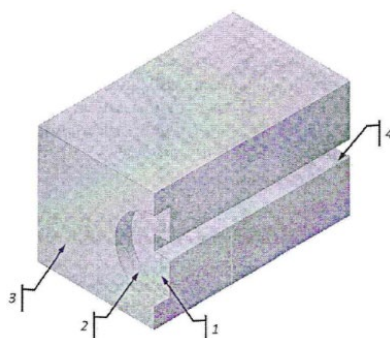


Рис. 3. Первая деталь

Fig. 3. The first workpiece

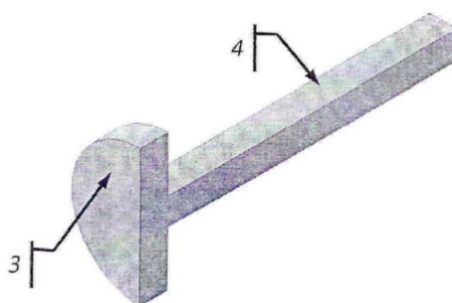


Рис. 4. Вторая деталь

Fig. 4. The second workpiece

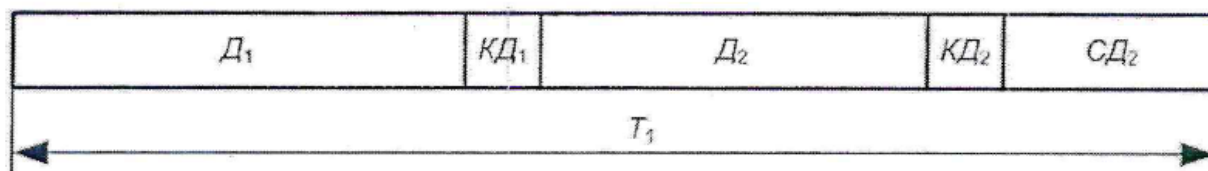


Рис. 5. Структурная схема традиционного технологического процесса изготовления второй детали

Fig. 5. Block diagram of the traditional manufacturing process of the second workpiece

Закключение

1. Методы реверс-инжиниринга применимы не только для копирования и изготовления сложных деталей машиностроения, но и для совершенствования технологий их изготовления и сборки.

2. Развитие способов защиты от копирования стимулирует создание сложных конструктивных и технологических решений, что не всегда способствует увеличению их функциональности и снижению производственных издержек.

3. Развитие реверс-инжиниринга несомненно получит своё дальнейшее развитие в

системах, реализующих алгоритмы искусственного интеллекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фридман Р. Обратная разработка великих свершений. Реверс-инжиниринг как путь к мастерству. М: Попурри, 2021. 149 с.

2. Кугаевский С.С. Реверс-инжиниринг и быстрое прототипирование в машиностроении: учебно-методическое пособие / Мин-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2023. 98 с.

3. Власов В.Н., Губанов А.В. Компьютерные технологии реверсивного проектирования [Электронный ресурс] URL: <https://sapr.ru/article/6661> (дата обращения: 25.07.2022).

4. **Ведмидь П.А.** Практический подход к реверсивному инжинирингу // САПР и графика. 2001. № 11. С. 77–81.

5. **Реверс-инжиниринг** изделий в Siemens NX от «А» до «Я» [Электронный ресурс] URL: <https://cccp3d.ru/topic/110958> (дата обращения: 08.12.2022)

6. **Рубанова К.А.** Исследование применения обратного инжиниринга российскими промышленными компаниями // Human Progress / Человеческое развитие. 2024. Выпуск 1. Том 10. ISSN 2414-4916.

7. **Якимович Б.А., Коршунов А.И., Кузнецов А.П.** Теоретические основы конструктивно-технологической сложности изделий и структур-стратегий производственных систем машиностроения: монография / Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1999. 132 с.

8. **Шарин Ю.С.** Теория сложности / Ю.С. Шарин, Б.А. Якимович, В.Г. Толмачев, А.И. и др. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2007. 280 с.

9. **Технология** машиностроения / Суслов А.Г.: учебник. М: КНОРУС, 2020. 336 с.

10. **Холмогорцев Ю.П., Крамаренко А.П.** Способ взаимной притирки сопряжений / Оpubл. 25.07.1981. Бюл. № 26. 2 с.

11. **Бирин Б.В., Перец М.И., Солью С.** Способ обеспечения взаимозаменяемости при притирке сопрягаемых деталей /. Розенберг. Оpubл. 07.12.1979. Бюл. №45. 4 с.

12. **Патент № 2554243** С1 Российская Федерация, МПК В23Р 11/00. Способ изготовления сборного изделия, состоящего из двух сопрягаемых деталей: № 2013159122/02: заявл. 30.12.2013: опубл. 27.06.2015 / Б. А. Якимович, Ю. В. Пузанов, В. В. Тарасов, А. Г. Бажин.

REFERENCES

1. Friedman R. Reverse engineering of great achievements. Reverse engineering as a way of best practices. Moscow: Popourri, 2021, 149 p.

2. Kugaevsky S.S. Reverse engineering and rapid prototyping in mechanical engineering: an courseware / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University, 2023, 98 p.

3. Vlasov V.N., Gubanov A.V. Computer technologies of reverse engineering [Electronic resource] URL: <https://sapr.ru/article/6661> (date of access: 07/25/2022).

4. Vedmid P.A. A practical approach to reverse engineering // CAD and graphics. 2001, no. 11. pp. 77–81.

5. Reverse engineering of products in Siemens NX from "A" to "Z" [Electronic resource] URL: <https://cccp3d.ru/topic/110958> (date of access: 08.12.2022)

6. Rubanova K.A. A study of the application of reverse engineering by Russian industrial companies // Human Progress / Human development. 2024, Issue 1, vol 10. ISSN 2414-4916.

7. Yakimovich B.A., Korshunov A.I., Kuznetsov A.P. Theoretical foundations of the constructive and technological complexity of products and structures-strategies of production systems of mechanical engineering: monograph / Izhevsk: IzGTU Publishing House, 1999, 132 p.

8. Sharyn Yu. S. Theory of complexity / Yu. S. Sharin, B.A. Yakimovich, V.G. Tolmachev, A. I. God. et al. Izhevsk: Publishing house of IzhSTU, 2007, 280 p.

9. Technology of mechanical engineering / Suslov A.G.: textbook. Moscow: KNORUS, 2020. 336 p.

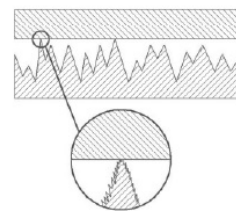
10. Kholmogortsev Yu.P., Kramarenko A.P. Method of mutual lapping of fits / Publ. 07/25/1981. Bul. no. 26, 2 p.

11. Birin B.V., Pepper M.I., Salt S. A method for ensuring interchangeability for lapping mating parts / Rosenberg, Publ. 12/07/1979, Bul. no. 45. 4 p.

12. Patent No. 2554243 S1 Russian Federation, IPC b23p 11/00. Method of manufacturing an assembled product consisting of two mating parts: No. 2013159122/02: application 30.12.2013: published 27.06.2015 / B. A. N. Yakimovich, Yu. N. V. Puzanov, V. N. V. Tarasov, A. N. G. N. Bazhina.

Статья поступила в редакцию 12.02.2025; одобрена после рецензирования 20.02.2025; принята к публикации 26.02.2025.

The article was submitted 12.02.2025; approved after reviewing 20.02.2025; assepted for publication 26.02.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 39-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 39-48.

Научная статья

УДК 669.35.5:621.793

doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-39-48

Влияние физико-химических факторов на структуру и свойства металлов в условиях контактной деформации при трении в поверхностно-активной смазочной среде

Лидия Ивановна Куксенова, д.т.н.

Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

lkukc@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9207-6587>

Аннотация. На основе представлений физико-химической механики контактного взаимодействия проведен материаловедческий анализ влияния физико-химических факторов на структуру и износостойкость антифрикционного сплава при трении в поверхностно-активных смазочных средах. Испытания пары трения бронза БрА5 и сталь 45 проводили на машине реверсивного трения скольжения в условиях, соответствующих режимам работы тяжело нагруженных узлов трения. Роль физико-химических факторов, связанных с поверхностной активностью среды, выявляли с использованием экспериментально полученной совокупности макроскопических интегральных критериев (феноменологических показателей трения и износа) и микроскопических (микроструктурных) критериев (физического уширения рентгеновских линий, периода кристаллической решетки, элементного состава поверхностного слоя материала зоны контактной деформации), определяемых с применением рентгеноструктурного метода исследования. Показано, что в основе формирования износостойкого структурного состояния материала в поверхностно-активной смазочной среде лежат два структурообразующих процесса: первый процесс – формирование стационарного макроскопического диффузионного потока атомов легирующих элементов и их переход в смазочную среду, что приводит к созданию поверхностного пластифицированного слоя, и второй процесс – понижение плотности дислокаций в материале зоны деформации, что указывает на эффект пластификации материала (снижение предела его текучести). В результате этих процессов материал зоны контакта существенно отличается от исходного по характеристикам напряженного состояния, микроструктуры и механических свойств. Применение в трибосопряжениях смазочных материалов, содержащих поверхностно-активные вещества, способствует образованию износостойкой структуры в антифрикционном материале.

Ключевые слова: трение, износ, металлы, смазочные материалы, поверхностно-активные вещества, фазовые превращения, контактная деформация, структура

Благодарности: Автор выражает искреннюю благодарность к.ф.-м.н. В.И. Савенко за участие в постановке работы и обсуждение экспериментальных результатов.

Для цитирования: Куксенова Л.И. Влияние физико-химических факторов на структуру и свойства металлов в условиях контактной деформации при трении в поверхностно-активной смазочной среде // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-39-48

Physical-chemical factors effect on the structure and properties of metals under conditions of contact deformation during friction in a surface-active lubricating medium

Lidiya I. Kuksenova, D. Eng.

Blagonravov Institute of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Russia

lkukc@mail.ru

Abstract. Based on the concepts of the physical-chemical mechanics of contact interaction, a materials science analysis of these factors effect on the structure and wear resistance of an antifriction alloy under friction in surface-active lubricating media has been carried out. Tests of the bronze BrA5 – steel 45 friction pair were carried out on a reversible sliding friction machine under conditions corresponding to the operating modes of heavily loaded friction units. The role of physical-chemical factors related to the surface activity of the medium was revealed using an experimentally obtained set of macroscopic integral criteria (phenomenal indicators of friction and wear) and microscopic (microstructural) criteria (physical broadening of X-ray lines, the period of the crystal lattice, the elemental composition of the surface layer of the material of the contact deformation zone), determined using the X-ray diffraction method. It is shown that the formation of a wear-resistant structural state of a material in a surface-active lubricating medium is based on two structure-forming processes. The first one is connected with the formation of a stationary macroscopic diffusion flow of atoms of alloying elements and their transition into a lubricating medium, which leads to the creation of a surface plasticized layer, and the second process is a decrease in the density of dislocations in the material of the deformation zone, which indicates the effect of plasticizing the material (reducing its yield point stress). As a result of these processes, the material of the contact zone differs significantly from the initial one in terms of stress state, microstructure, and mechanical properties. The use of lubricants containing surfactants in tribounits contributes to the formation of a wear-resistant structure in the antifriction material.

Keywords: friction, wear, metals, lubricants, surfactants, phase transformations, contact deformation, structure

Acknowledgments: The author expresses his sincere gratitude to PhD V.I. Savenko for participation in the work and discussion of the experimental results.

For citation: Kuksenova L.I. Physical-chemical factors effect on the structure and properties of metals under conditions of contact deformation during friction in a surface-active lubricating medium / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-39-48

Введение

Однако все явления, происходящие при внешнем трении, связаны с взаимодействием контактирующих тел как между собой, так и со смазочным материалом, что обеспечивает создание не только граничных смазочных слоев, которые являются продуктами реакции металла с активными компонентами смазочной среды, но и формируется модифицированный поверхностный слой конструкционных материалов в результате упругопластической деформации при трении. При этом механизм трения при граничной смазке представляет собой многостадийный механо-физико-химический процесс, включающий этапы адсорбции, модифицирования и разрушения трущихся поверхностей, а его конечным продуктом является формирование частиц износа.

Эксперименты свидетельствуют, что характерным показателем установившегося режима трения является реализация

периодических кинетических циклов накопления повреждений в зоне локализации деформации металла и разрушения, сопровождающихся динамическим равновесием между разрушением поверхностных структур и их восстановлением. Период этих циклов и их амплитуда являются кинетическими характеристиками накопления повреждаемости и разрушения тонкого поверхностного слоя и в макроскопическом масштабе определяют среднее значение интенсивности изнашивания материалов трибосопряжений для фиксированного пути трения. Согласно кинетической термофлуктуационной теории прочности [1], величина износа I оценивается соотношением $I = (\sum \Delta A_n h) / K [t_0 \exp((U_0 - \gamma \psi \sigma) / RT)]$, где $\sum \Delta A_n h$ – площадь фактического контакта; h – глубина зоны деформации; коэффициент K отражает исходную повреждаемость материала, характеристики релаксации повреждений, число одновременно разрушаемых связей; ψ – коэффициент энергетического поглощения в контакте (его

диссипативность), U_0 – энергия активации разрушения единичной связи; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – действующее напряжение; T – температура. Эффективная энергия активации разрушения определяется как $U_\sigma = U_0 \pm \Delta G - \gamma\sigma$, где ΔG – изменение энергии активации процесса в результате физико-химического воздействия смазочной среды, т.е. параметр, влияющий на кинетику разрушения, связанный со свойствами смазочной среды при трении [2]. Таким образом, при усталостном механизме изнашивания на работоспособность пары трения влияют активационные структурно-чувствительные параметры разрушения: энергия активации U_0 и коэффициент γ , имеющий смысл активационного объема. В условиях контактной деформации значения этих характеристик изменяются под влиянием поверхностно-активной смазочной среды.

В данной работе на примере пары трения медный сплав – сталь излагаются результаты экспериментальных исследований физико-химического влияния смеси дисперсионной среды и дисперсной фазы, входящих в состав пластичного смазочного материала, на реализацию структурно-фазовых превращений в поверхностно-модифицированных слоях антифрикционного сплава и интенсивность его поверхностного разрушения с целью выявления роли физико-химических факторов в формировании износостойкой структуры.

Материалы и методы исследования

Триботехнические испытания пары реверсивного трения скольжения медный сплав – сталь (алюминиевая бронза БрА5 – Ст45)

проводили на машине трения МТ-8 при номинальном контактном давлении 20 МПа и средней скорости относительного скольжения 0,1 м/с. Реверсивное трение, относящееся к тяжелым условиям испытаний с точки зрения деформации поверхностных слоев, позволяет более четко выявлять роль физико-химических факторов активного смазочного материала.

Смазочным материалом служили базовые дисперсионные синтетические среды и загуститель к ним, используемые для работы в трибосопряжениях в широком диапазоне температур и давлений. В качестве базовых сред испытывались синтетическое масло М9С, эфир бензилянтарной кислоты и широкой фракции спиртов C7-C12 ДЭБЯК, смесь дисперсионных сред М9С + ДЭБЯК (1:1). В качестве загустителя дисперсионных сред использовали 12-оксистеарат лития, литиевое мыло 12-оксистеариновой кислоты ($\text{LiC}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_3 = 12\text{-LioSt}$), которое вводилось в дисперсионную среду в количестве 12 %.

Роль среды выявляли с использованием критериальных подходов [3], основанных на экспериментально полученной совокупности макроскопических интегральных критериев (феноменологических показателей потерь на износ, I_h) и микроскопических (микроструктурных) критериев (физического уширения рентгеновских линий материала зоны контактной деформации $\beta_{(hkl)}$ и периода кристаллической решетки материала поверхностного слоя), определенных с помощью физических методов исследования [6].

Результаты и их обсуждение

Фрагменты дифрактограмм при рентгеноструктурных исследованиях деформированной при трении бронзы БрА5 приведены на рис. 1.

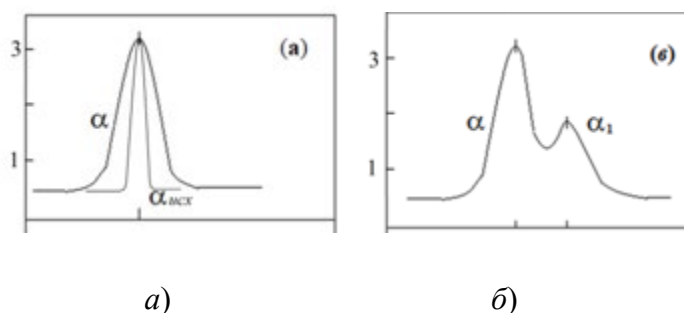


Рис. 1. Фрагменты дифрактограмм бронзы БрА5 после трения в средах: а – М9С; б – ДЭБЯК

Fig. 1. Fragments of brass Br5 diffractograms after friction in media: а – М9С; b – DEBYAK

В исходном состоянии алюминиевая бронза БрА5 представляет собой α -твердый раствор Cu-Al, и его дифрактограммы состоят из одной системы отражений (hkl) рентгеновских лучей, свойственной ГЦК решетке. После трения в масле М9С рентгенограммы зоны деформации бронзы фиксируют систему линий α -твердого раствора Cu-Al с их существенным уширением по сравнению с исходным состоянием (рис. 1, а). Под влиянием эфира ДЭБЯК в зоне деформации происходит концентрационное расслоение бронзы и формирование кристаллографически изоструктурных (т.е. с одинаковыми решетками Браве) твердых растворов Cu-Al, один из которых (α_1) является фазой с меньшим периодом, и, следовательно, обогащен медью.

Следовательно, при деформации модифицирование микроструктуры приповерхностного слоя бронзы происходит в результате двух параллельно протекающих процессов: изменения плотности дислокаций (уширение линий) и диффузионного перераспределения легирующего элемента в зоне контактной деформации трибоматериала (изменение его элементного и фазового состава). Рассмотрим количественные характеристики уровня разрушения поверхностного слоя бронзы и структурных состояний модифицированного слоя.

Временные зависимости износа бронзовых образцов $I_h = f(\tau)$ выявляют важную особенность процесса разрушения поверхности бронзы, интенсивность которого зависит от вида смазочной среды, заключающуюся во влиянии среды на периоды и амплитуды кинетических циклов. При трении в масле период накопления повреждаемости и амплитуда изменения износа достаточно велики, при трении в смеси с загустителем эти характеристики оказываются существенно меньше. Фиксированные во времени значения интенсивности

изнашивания бронзы I_h в двух средах на различных временных интервалах значительно отличаются, в особенности при малых и больших временах работы трибосопряжения (рис. 2).

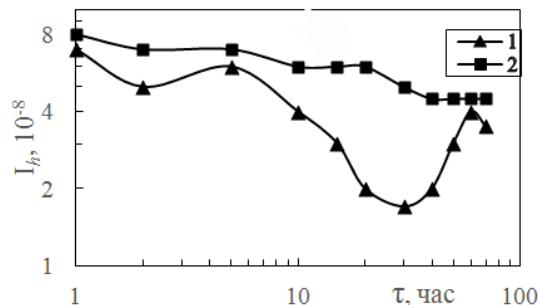


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания I_h бронзы от времени испытаний τ :
1 – в масле М9С; 2 – в среде (М9С + 12-ЛеоСт)

Fig. 2. Dependence of the I_h bronze wear intensity on the test time τ :
1 – in M9C oil; 2 – in medium (M9C + 12-LioSt)

Тем не менее, в среднем они близки между собой, хотя на всем временном интервале испытаний наблюдается тенденция более высокого износа образцов при их испытаниях в масле с загустителем. В последнем случае наблюдается устойчивое снижение интенсивности износа с увеличением длительности трибоиспытаний. Интенсивности изнашивания составляют $I_h \approx 4,5 \cdot 10^{-8}$ для смазки М9С + 12-ЛеоСт в режиме, близком к установившемуся (при $\tau = 70$ ч), и $I_h \approx 3,5 \cdot 10^{-8}$ для М9С в режиме, все еще далеком от стационарного при том же времени испытаний.

Объемно-временные изменения микроскопических характеристик поверхностного слоя бронзы БрА5 в среде масла М9С и в его смеси с загустителем 12-ЛеоСт представлены в табл. 1 и 2.

1. Физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(311)}$

1. Intrinsic broadening of X-ray lines $\beta_{(311)}$

Толщина слоя h	1 мкм	5 мкм	10 мкм
Значение $\beta_{(311)} \cdot 10^{-3}$, рад.			
До трения	30,0	17,5	14,0
Трение в среде М9С	38,0	22,0	13,5
Трение в смеси (М9С + 12ЛеоСт)	29,0	16,0	12,5

Данные, приведенные в табл. 1, отражают распределение значений физического

уширения рентгеновских линий по толщине слоя деформации бронзы. Поскольку $\rho \sim \beta_{(hkl)}^2$,

они позволяют качественно определить изменение плотности дислокаций ρ . Изменения значений $\beta_{(hkl)}$ указывают на основные процессы, одновременно происходящих при деформации бронзы в исследуемых смазочных средах. Во-первых, плотность дислокаций в слоях, прилегающих к свободной поверхности образцов, возрастает примерно в 1,6 раза при трении в масле М9С по сравнению с исходным состоянием (до трения, шлифованная поверхность), т.е. при трибodeформации образцов в неактивной смазочной среде наблюдается упрочняющий эффект. Во-вторых, присутствие дисперсной фазы 12-LioSt в смазочной системе обеспечивает систематическое понижение плотности

деформационных приповерхностных дислокаций (примерно в 1,7 раза по сравнению с чистой дисперсионной средой и в 1,1 раза по сравнению с исходным состоянием). Таким образом, в результате воздействия загустителя смягчаются энергосиловые граничные условия в трибоконтакте, и в приповерхностном слое трибоматериала реализуется пластифицирующий эффект.

Данные табл. 2 иллюстрирует распределения значений периода кристаллической решетки α -твердого раствора по глубине h деформированного слоя приповерхностного слоя тех же трибообразцов.

2. Изменение периода решетки α -твердого раствора Cu-Al (бронза БрА5)

2. Change in the lattice period of the α -solid Cu-Al solution (bronze BrA5)

a , нм М9С М9С+12-LioSt	Глубина слоя h , мкм					
	0,6	2,1	3,5	4,7	7,1	9,1
	0,3632	0,3637	0,3637	0,3635	0,3635	0,3636
	0,3620	0,3643	-	0,3660	0,3652	0,3638

В процессе временной трибodeформации поверхностного слоя бронзы в масле М9С величина периода решетки слабо осциллирует по всей глубине и составляет $\langle a_\alpha \rangle = 0,3632$ нм, что близко к стандартному значению периода решетки бронзы БрА5. Введение в смазочную систему загустителя 12-LioSt приводит к тому, что в процессе фрикционного воздействия в зоне деформации формируется нормальный к поверхности образца интенсивный макроскопический диффузионный поток атомов алюминия, направленный с одной стороны к выходу из образца, а с другой – в его внутриобъемную зону. При этом в слоях глубиной $h \leq 4$ мкм происходит заметное уменьшение периода a вплоть до значений $a_\alpha \approx 0,3620$ нм. Таким образом, в приповерхностном слое трибообразца вблизи межфазной границы металл / смазка создается положительный концентрационный градиент алюминия и, соответственно, положительный градиент механических свойств материала в целом, являющиеся предпосылками для формирования режима повышенной износостойкости такого материала. Полученная в работе [4] оценка происходящих под влиянием адсорбции ПАВ изменений предела текучести приповерхностного слоя, а также вариаций знака и величины остаточных напряжений, возникающих на разных глубинах этого

слоя, дает основания полагать, что именно процессы диффузии атомов алюминия одновременно как в смазку, так и в глубину трибоматериала обеспечивают снижение уровня упрочняющего эффекта в приповерхностном слое бронзы. Однако наблюдающееся увеличение концентрации алюминия в более глубоко залегающих подповерхностных слоях приводит к появлению в зоне деформации сплава горизонтально-протяженных пластинчатых концентрационных неоднородностей. В соответствии с моделью износа [5] это может являться причиной снижения износостойкости антифрикционного материала.

Таким образом, в зоне деформации бронзы при трении в масле М9С, содержащей загуститель, реализуются три ведущих структурных процесса: повышение плотности дислокаций за счет влияния дисперсионной среды – масла (упрочняющий эффект), понижение плотности дислокаций под влиянием дисперсной фазы – литиевого мыла 12-LioSt (пластифицирующий эффект) и реализация макроскопического диффузионного потока атомов алюминия в смазку и во внутриобъемную зону образца, создающий положительный градиент механических характеристик трибоматериала по глубине зоны деформации.

Результаты испытаний пары в смазке на основе сложных эфиров бензилянтарной кислоты и широкой фракции спиртов C₇-C₁₂ (ДЭБЯК) показали ряд особенностей

структуры и свойств бронзы в условиях контактной деформации, связанных с поверхностной активностью дисперсионной среды и дисперсной фазы, рис. 3, табл. 3 и 4.

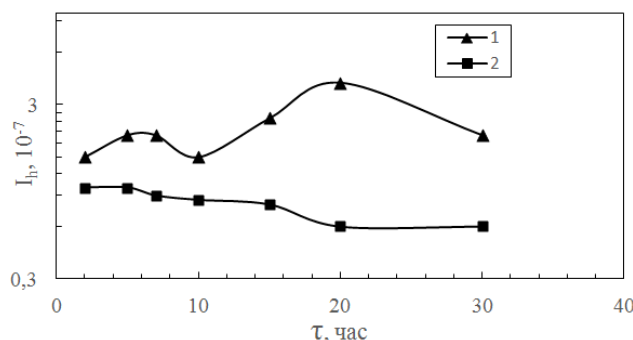


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания I_h бронзы БрА5 при трении в смазочных средах ДЭБЯК (1) и ДЭБЯК + 12-LioSt (2) от длительности испытаний τ

Fig. 3. Dependence of the wear intensity I_h of BR5 bronze upon friction in the lubricating media DEBYAK (1) and DEBYAK + 12-LioSt (2) on the duration of the tests τ

Временная зависимость интенсивности изнашивания в смазочной среде ДЭБЯК + 12-LioSt состоит из двух характерных участков – приработки и установившегося режима изнашивания. Износостойкость бронзы в этом случае повышается примерно в 2,5 раза несмотря на то, что на ее поверхности как в первой, так и во втором случаях образуется плотная и твердая пленка оксидов типа алюмината меди

(CuAl₂O₄), имеющих кристаллическую структуру шпинели (по данным рентгенофазового анализа). Эти факты свидетельствуют о более сложных физико-химических и микроструктурных процессах, происходящих в зоне деформации бронзы, которые определяют ее износостойкость. Экспериментальные данные, приведенные в табл. 3 и 4, раскрывают существо этих процессов.

3. Изменение периода решетки структурных составляющих (фаз α и α_1)

3. Change in the lattice period of the structural components (phases α and α_1)

ДЭБЯК	Глубина слоя h , мкм						
	a , нм	0,6	1,5	2,1	4,4	7,1	9,4
	α_1 -фаза	0,3618	0,3618	0,3618	-	-	-
	α -фаза	0,3663	0,3655	0,3650	0,3650	0,3640	0,3640
ДЭБЯК + 12-LioSt	Глубина слоя h , мкм						
	a , нм	1,0	2,5	3,0	4,5	7,1	9,5
	α -фаза	-	0,3640	-	0,3640	-	0,3640
	α_1 -фаза	0,3615	0,3623	-	0,3630	-	0,3631

Особенность деформации в поверхностно-активной смазочной среде состоит в том, в приповерхностном слое материала в результате распада первичного α -твердого раствора Cu-Al под влиянием возникающих в нем значительных остаточных упругих напряжений формируются две вторичные фазы α и α_1 . Они являются кристаллографически изоструктурными материнскому твердому раствору БрА5, т.е. сохраняют одинаковые с ним

решетки Браве, но имеют отличные от него периоды решетки. Так, фаза α имеет больший по сравнению с α -фазой БрА5 период решетки a и, следовательно, обогащена алюминием, фаза α_1 имеет заметно меньший, чем фаза α , период и обогащена медью.

Иная структурная картина возникает в приповерхностном слое бронзы при трении в смазочной среде ДЭБЯК + 12-LioSt. Присутствие в смазке загустителя (более активного

ПАВ, чем эфир) вызывает немедленное адсорбционное понижение прочности образующейся поверхностной оксидной пленки (1-я форма эффекта Ребиндера) и ее хрупкое растрескивание. При этом активная смазка, проникает к поверхности бронзы и пластифицирует ее приповерхностный слой. В результате трибоздействия в нем возникают остаточные напряжения сжатия [4]. В результате происходит спинодальный распад этого раствора на две новые более устойчивые фазы α и α_1 с разными концентрациями Cu и Al. Обогащенная медью вторичная фаза α_1 , формируется по всей модифицированной зоне. В этой фазе реализуется положительный градиент концентрации алюминия по глубине слоя. Присутствие вторичной фазы α в поверхностном слое

материала оказывается заметным лишь на достаточной его глубине, при $h \geq 2$ мкм. В этом интервале глубин h она сохраняет постоянное значение периода $a = 0,3640$ нм, которое заметно превышает исходное равновесное значение периода решетки бронзы БрА5.

Анализ совокупности свойств фаз α_1 и α дает основания полагать, что формирование при трении бронзы в среде ДЭБЯК + 12-LioSt обогащенной медью фазы α_1 , обладающей положительным градиентом микроструктурных характеристик по толщине модифицированной зоны, способствует повышению износостойкости бронзы.

Рассмотрим характеристики дислокационной структуры материала в зоне контактной трибodeформации (табл. 4).

4. Физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(311)}$ бронзы БрА5

4. Intrinsic broadening of the $\beta_{(311)}$ bronze BrA5 X-ray lines

Толщина слоя h , мкм	1	5	10
Значение $\beta_{(311)}, \cdot 10^{-3}$ рад.			
До трения	30,0	17,5	13,0
Трение в среде ДЭБЯК, α -фаза	25,5	17,0	12,0
Трение в среде ДЭБЯК, α_1 -фаза	27,0	-	-
Трение в среде (ДЭБЯК + 12-LioSt), α -фаза	24,0	14,3	12,0
Трение в среде (ДЭБЯК + 12-LioSt), α_1 -фаза	36,0	28,0	13,0

Анализ представленных в табл. 4 данных показывает, что эфир ДЭБЯК снижает плотность дислокаций в обеих вторичных фазах по сравнению с исходным однофазным состоянием материала. При этом уровень снижения плотности дислокаций в обогащенных медью фазе α_1 ниже, чем в фазе α , обогащенной алюминием. Композиционная смазочная среда ДЭБЯК + 12-LioSt усиливает эффект снижения плотности дислокаций в α_1 -фазе, однако в фазе α на глубинах $h \leq 5$ мкм общая плотность дислокаций существенно увеличивается до значения, которое превышает значение этой характеристики не только при трении в чистом эфире, но и в исходном (до трения) состоянии. Таким образом, прямое физико-химическое влияние активной смазочной среды на структуру и свойства бронзы приводит к неоднозначным результатам: обогащенная медью фаза α_1 относительно пластифицируется, а фаза α – упрочняется. Наличие упрочненных фаз в приповерхностном слое трибоматериала является основной причиной, тормозящей процесс

формирования структуры, обеспечивающей высокую износостойкость, характерную для явления избирательного переноса [7, 8], рис. 3, кривая 2.

При производстве промышленных пластичных смазочных материалов применяется смесь дисперсионных сред М9С и ДЭБЯК в сочетании с дисперсной фазой 12-LioSt. Основываясь на приведенных выше экспериментальных данных, свидетельствующих о влиянии физико-химических факторов компонентов смазки на структуру и свойства бронзы в условиях контактной деформации, а также результаты, опубликованные в [9], рассмотрим изменения характеристик модифицированного слоя, связанных с ролью композиционной смазки в целом.

Совокупность микроскопических характеристик антифрикционного сплава (бронза БрА5), полученных по результатам испытаний в смеси М9С + ДЭБЯК и смазке М9С + ДЭБЯК + 12 % 12-LioSt представлена в табл. 5 и 6.

5. Физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(311)}$ бронзы БрА5

5. Intrinsic broadening of the $\beta_{(311)}$ bronze BrA5 X-ray lines

Толщина слоя h	1 мкм	5 мкм	10 мкм
Значение $\beta_{(311)} \cdot 10^{-3}$ рад.			
До трения (шлифованная поверхность), Cu-Al	30,0	17,5	13,0
Трение в смеси (М9С + ДЭБЯК), фаза α	22,5	15,0	14,0
Трение в смеси (М9С + ДЭБЯК), фаза α_1	40,0	35,0	17,5
Трение в смазке (М9С + ДЭБЯК + 12-LioSt), фаза α	22,0	16,0	14,0
Трение в смазке (М9С + ДЭБЯК + 12-LioSt), фаза α_1	38,5	35,5	17,0

При трении в смеси М9С + ДЭБЯК структурные составляющие α и α_1 деформированного слоя, образующиеся в результате концентрационного расслоения бронзы при трибодеформации в активной среде, имеют различные значения структурного параметра, $\beta_{(311)} \sim \rho^{0.5}$. Для обогащенной алюминием α -фазы величина $\beta_{(311)}$ и, следовательно, общая плотность дислокаций ρ оказываются меньше, чем их значения для исходного сплава. Для α_1 -фазы, обогащенной медью, значения $\beta_{(311)}$ и ρ существенно выше по сравнению с их значениями не только в исходном состоянии бронзы, но и с этими характеристиками для фазы α , содержащей более высокую концентрацию алюминия. Присутствие в смазке загустителя 12-LioSt незначительно снижает величины $\beta_{(311)}$ и ρ в этих фазах. Таким образом, можно

полагать, что сочетание эфира ДЭБЯК с синтетическим маслом М9С и загустителем по существу не изменяет характер физико-химического влияния среды на процессы трибодеформации, происходящие в приповерхностном слое материала (по сравнению с испытаниями в смесях с одной дисперсионной средой): наблюдается как пластифицирующий эффект, так и упрочняющий с превалирующим действием последнего (изменяются лишь количественные характеристики).

При испытаниях пары в средах на основе смеси (М9С + ДЭБЯК в поверхностном слое бронзы также возникает макроскопический диффузионный поток атомов алюминия, приводящий к концентрационному расслоению исходного сплава (табл. 6).

6. Изменение периода решетки структурных составляющих фаз α и α_1

6. Change in the lattice period of the structural components of phases α and α_1

(М9С + ДЭБЯК)	Глубина слоя h , мкм					
	a , нм	0,5	2,0	3,5	5,0	9,3
	α -фаза	0,3623	0,3625	0,3623	0,3623	0,3623
	α_1 -фаза	0,3595	0,3595	0,3595	0,3595	0,3595
(М9С + ДЭБЯК + 12-LioSt)	Глубина слоя h , мкм					
	a , нм	0,5	2,0	3,5	5,0	9,3
	α -фаза	0,3630	0,3630	0,3630	0,3630	0,3630
	α_1 -фаза	0,3595	0,3582	0,3600	-	-

Периоды кристаллической решетки относительно обогащенных алюминием вторичных фаз α в обеих смазочных средах достаточно близки, т.е. добавка загустителя в смазку практически не влияет на состав слоя и уровень остаточных напряжений в нем. Однако загуститель ограничивает массовую интенсивность

пространственного расслоения исходного твердого раствора по глубине h : обогащенная медью фаза α_1 рентгеновски визуализируется лишь в поверхностном слое материала толщиной $h \leq 3,5$ мкм.

Следует отметить, что экспериментально обнаружено периодическое появление

и разрушение оксидов со структурой шпинели – алюминатов меди CuAl_2O_4 на поверхности трения в среде (М9С + ДЭБЯК + 12-ЛеоСт). При трении в смазочной среде с загустителем интенсивность линий на рентгенограммах, соответствующих этому оксиду, значительно выше, чем при трибоиспытаниях без загустителя. Это указывает на их относительно большее массовое (объемное) содержание в первом случае, что может являться причиной более высокого уровня разрушения поверхности при испытаниях в такой трехкомпонентной смазке. Этот вывод подтверждается зависимостями интенсивности изнашивания от времени (рис. 4).

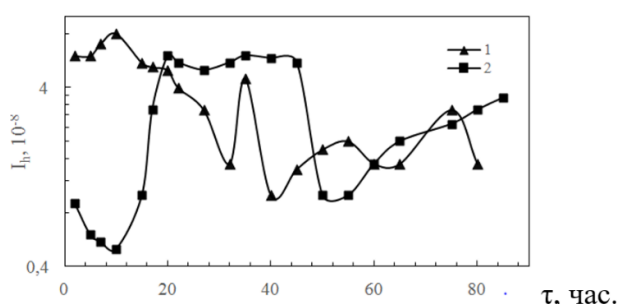


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания I_h бронзы БрА5 от времени испытания τ :
1 – смесь (М9С + ДЭБЯК); 2 – смазка (М9С + ДЭБЯК + 12-ЛеоСт)

Fig.4. Dependence of the wear intensity I_h of BR5 bronze on the test time τ :
1 – mixture (M9C + DEBAK); 2 – lubricant (M9C + DBAK + 12-LioSt)

Колебательный характер процесса изнашивания в обеих средах с характерными максимумами и минимумами величины I_h представлен на рис. 4. При этом амплитуда и период колебаний величины I_h при испытаниях в смазке с загустителем оказываются существенно большими.

Таким образом, проведенные исследования показали, что особенности влияния дисперсионной среды и загустителя на процессы контактного взаимодействия металлических пар трения и их работоспособность в условиях реверсивного трения скольжения взаимосвязаны с физическими и химическими свойствами составляющих смазочной среды. Литевой мыло 12-оксистеариновой кислоты не только формирует структурный каркас пластичного смазочного материала, но и активно, так же как и дисперсная фаза, влияет на физико-химические процессы в зоне деформации трибометалла, изменяя структуру и свойства

его поверхностного слоя и тем самым влияет на сопротивление изнашиванию трибопары в целом.

Заключение

Совокупность экспериментальных данных по интенсивности изнашивания в сопоставлении с характеристиками структурного состояния зоны деформации на примере бронзы БрА5 в нагруженном скользящем сопряжении в паре со сталью 45 показала, что наиболее полную оценку влияния физико-химических факторов на структуру и свойства металлов в условиях контактной деформации при трении в поверхностно-активной смазочной среде можно получить, используя критериальные подходы, отражающие разные масштабно-иерархические уровни работы трибосистемы: это макроскопический интегральный критерий – интенсивность изнашивания, и микроскопические структурные критерии – физическое уширение рентгеновских линий, которое определяет плотность дислокаций и уровень микронапряжений в деформированном металле, и период кристаллической решетки, определяющий уровень макронапряжений в металлическом материале и его элементный состав. Такой подход позволяет в целом оценивать качество работы узла трения, совместимость конструкционных и смазочных материалов, обоснованно назначать состав смазочного материала.

При трении в активном смазочном материале контактная деформация сопровождается характерными структурными превращениями: повышением плотности дислокаций за счет влияния дисперсионной среды, вызывающей при трибодеформации упрочняющий эффект; понижением плотности дислокаций под влиянием дисперсной фазы, создающей пластифицирующий эффект; реализацией макроскопического диффузионного потока алюминия к поверхности, характеризующийся положительным градиентом по глубине слоя и выявляющей тенденцию формирования износостойкого структурного состояния; окислением поверхности трения и образованием оксидов разного типа.

Направление и скорость физико-химических процессов в зоне контакта, а также интенсивность поверхностного разрушения материала зависят от внешних нагрузочно-скоростных параметров процесса, температуры в зоне трения, состава и структуры контактирующих металлических материалов, природы и свойств компонентов смазочной среды. Этот комплекс

характеристик трибосопряжения взаимообусловленно влияет на деформационные процессы в зоне контакта, формируя структурное состояние поверхностного слоя трибоматериала, зависящее от физико-химического действия смазки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Журков С.Н.** К вопросу о физической основе прочности // ФТТ. 1980. Т. 22. Вып. 2. С. 3344–3349.
2. **Громаковский Д.Г.** Разрушение поверхностей при трении и разработка кинетической модели изнашивания // Вестник машиностроения. 2000. № 1. С. 3–9.
3. **Савенко В.И., Щукин Е.Д.** О соотношениях между феноменологическими и структурными критериями работы узлов трения // Трение и износ. 1987. Т. 8. № 4. С. 581–589.
4. **Савенко В.И.** Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994. № 3–4. С. 26–38.
5. **Suh N.P.** The delamination theory of wear // Wear, 1973. V. 25. No1. P. 111–124.
6. **Куксенова Л.И., Савенко В.И.** Физико-химическая механика поверхностных слоев антифрикционного материала, функционирующего в поверхностно-активной смазочной среде // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2024. Т. 60. № 2. С. 81–96.
7. **Кужаров А.С., Кужаров А.А.** Избирательный перенос: мифы и реалии // Вестник РГУПС. 2011. № 4. С. 43–51.
8. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение. 212 с.
9. **Kuksenova L.I., Savenko V.I.** Effect of Surface-Active Media on Contact Elastoplastic Deformation of

Surface Layers of Metals and Their Tribological Characteristics // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2024. V. 98. No 7. P. 1411–1424.

REFERENCES

1. **Zhurkov S.N.** Determining the physical nature of the strength // FTT. 1980, vol.22, Issue 2, pp. 3344–3349.
2. **Gromakovsky D.G.** Destruction of surfaces by friction and development of a kinetic model of wear // Bulletin of Mechanical Engineering. 2000, no. 1, pp. 3–9.
3. **Savenko, V.I., Shchukin, E.D.** On the relations between phenomenological and structural criteria of friction unit operation, *Trenie Iznos*, 1987, no. 4, pp. 581–589.
4. **Savenko, V.I.** The role of the Rebinder effect in the implementation of the wear-free regime in tribological engineering// *Effekt Bezyznosn. Tribotekhnol.*, 1994, no. 3–4, pp. 26–38.
5. **Suh N.P.** The delamination theory of wear // *Wear*, 1973. V.25. No1. P. 111–124.
6. **Kuksenova L.I., Savchenko V.I.** Physical-chemical mechanics of surface layers of an antifricition material operating in a surface-active lubricating medium // *Physics-chemistry of the surface and protection of materials*. 2024, vol.60, no. 2, pp. 81–96.
7. **Kuzharov A.S., Kuzharov A.A.** Selective transfer: Myths and realities // *Bulletin of the Russian State Pedagogical University*. 2011, no.4. pp. 43–51.
8. **Rybakova L.M., Kuksenova L.I.** Structure and wear resistance of metal. Moscow: Mashinostroenie, 212 p.
9. **Kuksenova L.I., Savenko V.I.** Effect of Surface-Active Media on Contact Elastoplastic Deformation of Surface Layers of Metals and Their Tribological Characteristics // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2024. V. 98. No7. P. 1411–1424.

Статья поступила в редакцию 25.04.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 19.05.2025

The article was submitted 25.04.2025; approved after reviewing 14.05.2025; assepted for publication 19.05.2025

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 А.Ю. Кленичева. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.07.2025. Выход в свет 30.07.2025.

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

Научноёмкие технологии в машиностроении, №7 (169) 2025

«Science intensive technologies in mechanical engineering», №7 (169) 2025