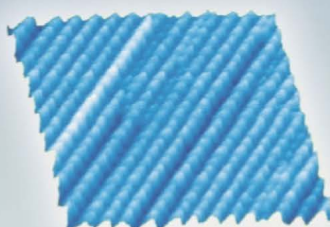


НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

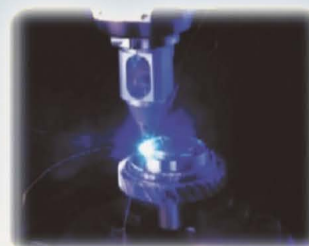
4 (166)
2025

ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

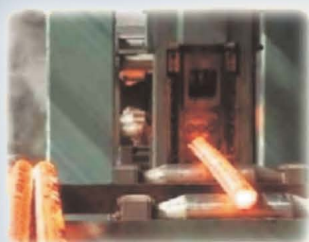


НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ

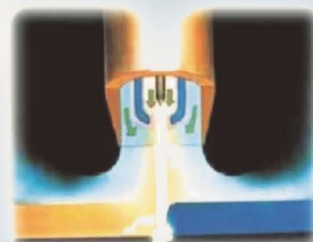
ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



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

№ 4 (166)

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. ОБЧИННИКОВ 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

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Григорьянц А.Г., Елизаветский К.С. Промышленные установки
для аддитивного производства, выпускаемые в московском
центре лазерных технологий 3

Мельникова М.А., Таксанц М.В., Голованова И.В., Мельников Д.М.
Применение математического моделирования в аддитивных
технологиях для топологической оптимизации 8

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Душко О.В., Крюков С.А. Эффективность импрегнированного
абразивного инструмента при обработке деталей подшипников 17

Бровкова М.Б., Купцова А.В., Купцов П.В., Мартынов В.В.
Технология и результаты изучения процесса изменения
состояния металлорежущего инструмента 24

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Бутенко В.И., Лебедев В.А., Кадач Р.Г. Научные технологии,
обеспечивающие повышение производительности и надежности
изделий машиностроения 32

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕМОНТЕ, ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Суслов А.Г., Дербуш Д.А., Шалыгин М.Г. Электрохимическое
шлифование гальванизированных электрических соединителей
для увеличения коэффициента трения покоя в соединении 40

*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 «Научные технологии в машиностроении»,
допускаются со ссылкой на источник информации и только
с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 4 (166)

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

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

Grigoryants A.G., Elizavetsky K.S. Industrial installations for additive
manufacturing, manufactured at the moscow center for laser technologies 3

Melnikova M.A., Taxants M.V., Golovanova I.V., Melnikov D.M.
Mathematical modeling in additive technologies used
for topological optimization 8

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Dushko O.V., Kryukov S.A. The impregnated abrasive tool potency
in mechanical tooling of bearing parts 17

Brovkova M.B., Kuptsova A.V., Kuptsov P.V., Martynov V.V.
Technology and results of studying the diversification
of the operative conditions of metal cutting tools 24

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

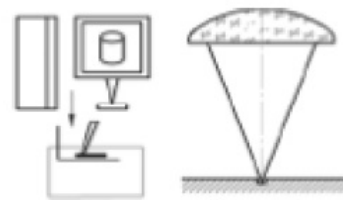
Butenko V.I., Lebedev V.A., Kadach R.G. High-tech technologies
for the improvement of the productivity and reliability of mechanical
engineering products 32

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN COATING, PARTS REPAIR AND RECOVERY

Suslov A.G., Derbush D.A., Shalygin M.G. Electrochemical grinding
of galvanized electrical connectors for the raise of static coefficient
of friction in the connection. 40

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. №4 (166). С.3-7.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №4 (166). P.3-7.

Научная статья
УДК 621.791.9
doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-3-7

Промышленные установки для аддитивного производства, выпускаемые в московском центре лазерных технологий

Александр Григорьевич Григорьянц¹, д.т.н.
Константин Сергеевич Елизаветский², инженер

^{1, 2} *Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва, России*

^{1, 2} Mt12@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

***Аннотация.** Представлен десятилетний путь развития от первых установок до современного комплекса, спроектированного и изготовленного полностью на отечественных комплектующих, включая программное обеспечение и оптическую систему. Первая установка СЛП-110, изготовленная в 2016 г. имела объем построения 110×110×200 мм. В течение ряда лет были выполнены многочисленные научно-исследовательские работы, послужившие основой разработки технологических процессов выращивания деталей и узлов из различных металлических порошков. В последующих разработках объем, выращиваемых изделий был увеличен до 250×250×300 мм. В результате выполненных НИОКР была спроектирована и изготовлена более совершенная установка СЛП-250. В этой установке с помощью системы датчиков предусмотрен полный автоматический контроль и управление параметрами процесса при длительной непрерывной многосуточной работе комплекса с обеспечением высокой надежности и стабильности. Ряд установок успешно эксплуатируются в нашей промышленности в производстве сложных изделий из разнообразных металлических, керамических и композиционных порошков, выпускаемых в нашей стране. Следующим этапом развития аддитивного производства является организация участков по изготовлению деталей на основе аддитивных комплексов и периферийного оборудования. Необходимо организовать в нашей стране серийный выпуск имеющихся установок и разрабатывать оборудование, обеспечивающее увеличение производительности процесса.*

Ключевые слова: аддитивная технология, оборудование, кинематика, основные узлы, система управления, программное обеспечение

Для цитирования: Григорьянц А.Г., Елизаветский К.С. Промышленные установки для аддитивного производства, выпускаемые в Московском центре лазерных технологий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 3–7. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-3-7

Industrial installations for additive manufacturing, manufactured at the moscow center for laser technologies

Alexander G. Grigoryants¹, D. Eng.
Konstantin S. Elizavetsky², engineer

^{1, 2} *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

^{1, 2} Mt12@bmstu.ru

Abstract. *The decade-long period of the evolution starting from the first installations to a modern complex, designed and manufactured entirely using just indigenous content, including software and an optical system, is presented. The first SLM-110*

installation, manufactured in 2016, had a construction volume of $110 \times 110 \times 200$ mm. Over the years, numerous research projects have been carried out. They served as the basis for the development of technological processes for growing parts and units obtained from various metal powders. In subsequent developments, the volume of grown products was increased to $250 \times 250 \times 300$ mm. As a result of the completed R&D, a more advanced SLM-250 installation was designed and manufactured. In this installation with a sensor system a full automatic monitoring and control of process parameters is provided for long-term continuous operation of the complex for many days, ensuring high reliability and stability. A number of plants are successfully used in our industry in the production of complex products from a variety of metal, ceramic and composite powders produced in our country. The next stage in the development of additive manufacturing is the organization of sites for the manufacture of parts based on additive complexes and peripheral equipment. It is necessary to organize serial production of existing installations in our country and develop equipment to increase the process performance.

Keywords: additive technology, equipment, kinematics, main components, control system, software

For citation: Grigoryants A.G., Elizavetsky K.S. Industrial installations for additive manufacturing, manufactured at the moscow center for laser technologies / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 3–7. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-3-7

Технологические процессы выращивания деталей и узлов металлических изделий являются по существу развитием и усовершенствованием технологии наплавки. Эти процессы объединены под названием аддитивные технологии изготовления металлических конструкций. Классификация аддитивных технологий производства изделий из металлических материалов и сложившаяся резкообразная терминология представлены в работе [1]. Это в основном технологии аддитивного производства дуговой наплавкой проволочных материалов, плазменные технологии, электронно-лучевые, лазерные.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана и в организованном при университете малом предприятии «Московский центр лазерной технологии (МЦЛТ)» изготавливаются лазерные технологии селективного сплавления металлических порошков (СЛП) и прямого лазерного осаждения подачей порошка коаксиально лазерному лучу (КЛП).

Была изготовлена отечественная установка селективного лазерного плавления СЛП-110 (рис. 1) с объемом построения $110 \times 110 \times 200$ мм [2]. В этой установке используются порошки из различных металлов и сплавов российского производства. Проектирование этой установки выполнено на уровне современных представлений о «цифровизации» сложного высокоточного оборудования с программным управлением целого ряда параметров процесса. Источником излучения является иттербиевый волоконный технологический лазер. Сплавление порошка осуществляется в герметичной камере, из которой откачивают воздух и заполняют защитным газом. Специализированное программное обеспечение через единый интерфейс обеспечивает полный контроль и управление параметрами процесса выращивания. Обязательным условием при длительной непрерывной многочасовой работе установки является ее стабильность и надежность.



Рис. 1. Установка селективного лазерного плавления СЛП-110

Fig. 1. Selective laser melting unit SLM-110

Полученные данные по многолетней эксплуатации комплекса СЛП-110 (рис. 2, а), а также разработанные многочисленные технологические процессы выращивания образцов и деталей из разнообразных порошковых материалов послужили основой дальнейших исследований по разработке более совершенной конструкции установки селективного лазерного плавления СЛП-250 (рис. 2, б).

Установка СЛП-250 предназначена для полностью автоматизированного производства, не только единичного, но и серийного, из металлических, керамических и композиционных порошков. Данная установка может использоваться также для отработки режимов сплавления с целью получения оптимальных физико-механических характеристик деталей и узлов конструкций. Размер рабочей зоны (Д×Ш×В) 250×250×300 мм.

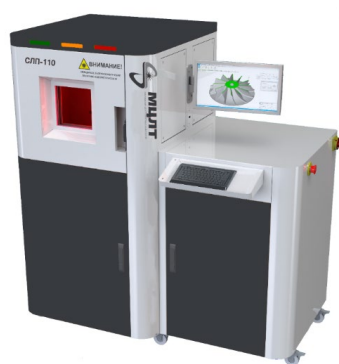
Используется иттербиевый волоконный лазер мощностью 400 Вт, обеспечивающий производительность до 30 см³/ч при толщине выращиваемого слоя от 20 до 200 мкм в зависимости от материала и режима построения. Габариты комплекса составляют 2450×1550×1930 мм.

Процесс выращивания осуществляется в герметичной камере с контролируемой атмосферой и системой удаления из камеры побочных продуктов плавления. Технологический процесс программируется на стадии обработки

трехмерной модели детали с возможностью выполнения эмуляции всего процесса. Очень важным условием, расширяющим возможности аддитивного производства, является возможность корректировки детали в ходе ее выращивания.

Следующим поколением оборудования, разработанного специалистами Московского центра лазерных технологий, является комплекс СЛП-250Б (рис. 2, в). При изготовлении этого комплекса практически полностью используются отечественные комплектующие. По своим технологическим характеристикам и качеству изготовления детали выращиванием комплекс не уступает зарубежным моделям аналогичного класса. Рекомендуется для использования в различных отраслях промышленности: судостроение, энергомашиностроение, приборостроение, авиастроение, ракетостроение, инструментальная и другие предприятия оборонно-промышленного комплекса.

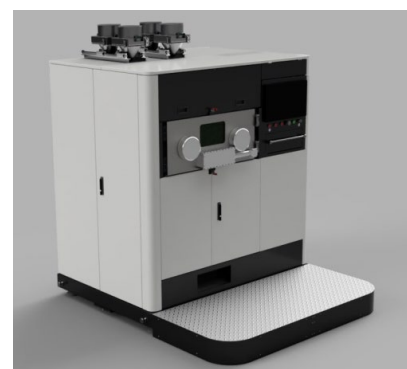
Ряд установок СЛП успешно эксплуатируется в нашей промышленности в единичном, мелкосерийном и серийном производстве сложных изделий из разнообразных металлических, керамических и композиционных порошков, выпускаемых отечественной промышленностью. Серии комплексов СЛП, выпускаемых в настоящее время Московским центром лазерных технологий для промышленного применения, представлены на рис. 2.



а)



б)



в)

Рис. 2. Серия комплексов селективного лазерного плавления для промышленного применения:
а – СЛП-110; б – СЛП-250; в – СЛП-250Б

Fig. 2. A series of selective laser melting complexes for industrial applications:
a – SLM-110; b – SLM-250; c – SLM-250B

Дальнейшим развитием аддитивного производства (АП) в отечественной промышленности является организация участков АП по изготовлению деталей и изделий методом селективного лазерного плавления, основой которых составляют аддитивные комплексы

СЛП-250 и СЛП-250Б. Такой участок АП создан на ведущем предприятии страны с расположением оборудования, представленном на (рис. 3), и обеспечивающим полный производственный цикл получения изделия.

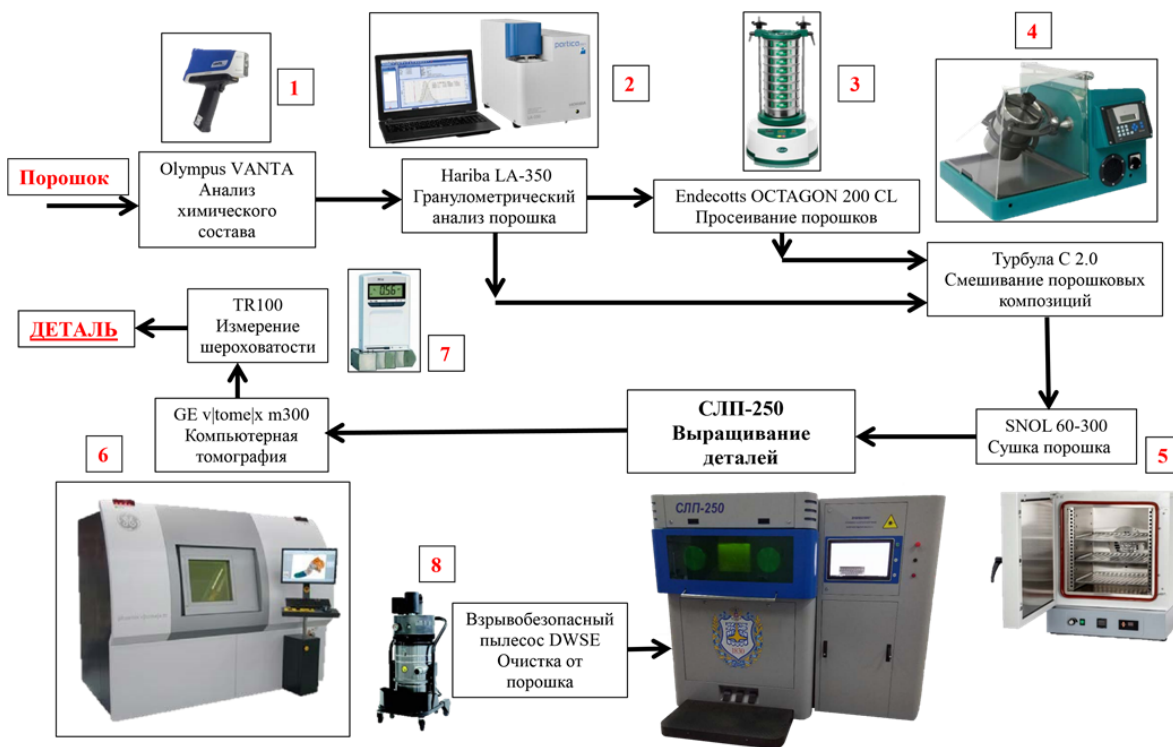


Рис. 3. Производственный цикл в цехе аддитивного производства

Fig. 3. Production cycle in the additive manufacturing shop

Для успешного широкого применения технологии аддитивного производства методом селективного лазерного плавления необходимо организовать в стране серийный выпуск имеющихся установок и разрабатывать оборудование для повышения производительности процесса [3].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / под редакцией А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2007. 669 с.
2. Wohlers T. Wohlers Report. ForCollins: Associates, INC, 2014. 276 p.
3. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / А.Г. Григорьянца и др.; под редакцией А.Г. Григорьянца, М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 278 с.

4. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазерная прецизионная микрообработка-материалов. М.: Физматма, 2017. 416 с.
5. Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций: учебник / А.В. Щербаков, Д.А. Гапонова, А.П. Слива и др.; под редакцией А.Г. Григорьянца, В.К. Драгунова. М.: Издательство МЭИ, 2022. 676 с.
6. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Физические основы технологических лазеров: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., стер. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2021. 190 с. (Лазерная техника и технология: в 7кн. Кн. 1 / под ред. А.Г. Григорьянца).
7. Богданов А.В., Голубенко Ю.В. Волоконные технологические лазеры и их применение. учебное пособие. СПб.: Лань, 2016. 208 с.
8. Григорьянц А.Г. Устройство для выращивания изделий методом селективного лазерного плавления / Пат. на полезную модель № 167468, 29 октября 2015 г.
9. Колчанов Д.С., Григорьянц А.Г., Дренин А.А. Установка для выращивания изделий селективным лазерным плавлением / Патент на полезную модель №-185513, 24 апреля 2017 г.

10. Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О. Установка для изготовления деталей селективным лазерным плавлением / Патент на изобретение № 2801360, 19 июля 2022 г.

11. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Оборудование для лазерной обработки / под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. 285 с.

REFERENCES

1. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Technological processes of laser processing: Study guide for universities / Edited by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2007, 669 p.

2. Wohlers T. Wohlers Report. ForCollins: Associates, INC, 2014.p. 276/

3. Laser additive technologies in mechanical engineering: a textbook/A.G. Grigoryants et al.; edited by A.G. Grigoryants, Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2018, 278 p.

4. Grigoryants A.G., Kazaryan M.A., Lyabin N.A. Laser precision micro-processing of materials. Moscow: Fizmata, 2017, 416 p.

5. Additive technologies in the production of metal structures: textbook / A.V. Shcherbakov, D.A. Gaponova, A.P. Sliva et al.; edited by A.G. Grigoryants, V.K. Dragunov. - M.: Publishing House of the MEI, 2022, 676 p.

6. Golubev V.S., Lebedev F.V., Physical foundations of technological lasers: textbook for universities, 3rd ed., ster. m.; Berlin: DirectMedia, 2021,190 p. (Laser technology and technology: in 7 books. Book 1/edited by A.G. Grigoryants).

7. Bogdanov A.V., Golubenko Yu.V. Fiber technological lasers and their application, study guide. St. Petersburg: Lan, 2016, 208 p.

8. Grigoryants A.G. Device for growing products by selective laser melting / Patent for utility model No. 167468, October 29, 2015.

9. Kolchanov D.S., Grigoryants A.G., Dronin A.A. Installation for growing products by selective laser melting / Utility model patent No.-185513, April 24, 2017.

10. Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O. Installation for manufacturing parts by selective laser melting / Patent for invention No. 2801360, July 19, 2022

11. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Equipment for laser processing / edited by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2022, 285 p.

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 02.02.2025; одобрена после рецензирования 13.02.2025; принята к публикации 16.02.2025.

The article was submitted 02.02.2025; approved after reviewing 13.02.2025; assepted for publication 16.02.2025.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №4 (166). С.8-16.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №4 (166). P.8-16.

Научная статья
УДК 621.7.01
doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-8-16

Применение математического моделирования в аддитивных технологиях для топологической оптимизации

Мария Александровна Мельникова¹, к.т.н.
Марина Вячеславовна Таксанц², ст. преподаватель
Ирина Васильевна Голованова³, к.п.н.
Дмитрий Михайлович Мельников⁴, к.т.н.

^{1,2,4} МГТУ им. Н.Э. Баумана, РФ, Москва, Россия

³ ФГК ОУ «Ставропольское президентское кадетское училище»

¹ maria.melnikova@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6971-3322>

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

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

⁴ melnikovd@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3451-8217>

Аннотация. Аддитивные технологии хорошо зарекомендовали себя в промышленности. Как правило, речь идёт о технологиях, так называемых синтез на подложке (селективное лазерное плавление и подобные), которые позволяют создавать изделия со сложной геометрией, внутренними каналами и т.п. Современное программное обеспечение позволяет значительно расширить возможности подобных технологий. Одним из направлений развития в этой области является внедрение генеративного искусственного интеллекта, например, для проведения топологической оптимизации с целью уменьшения веса изделия без потери прочностных характеристик. В её основе лежат известные математические модели и численные методы расчётов. При этом в настоящее время стало возможным производить расчёты нескольких моделей в зависимости от задаваемых параметров параллельно. На данный момент для проведения моделирования и расчётов используются несколько алгоритмов, которые показывают высокие результаты, но требуют дополнительной проверки полученных результатов перед внедрением в производство. В данной работе представлены основные математические модели и рассмотрены особенности, на основе которых происходит оптимизация в аддитивных технологиях, рассмотрены примеры комбинации моделей. На примере перспективного метода оптимизации проанализированы существующие ограничения и возможности их преодоления. Ввиду особенностей моделирования одной из задач является получение результатов наиболее приближённых к реальным, поэтому предложен вариант улучшения работы с учётом реальных значений экспериментов. Также предложена схема для понимания особенностей работы различных методик, позволяющая определить возможный вариант расчёта данных в зависимости от имеющихся начальных условий.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, метод двунаправленной эволюционной оптимизации конструкций, аддитивные технологии, искусственный интеллект, математическое моделирование, программы моделирования

Для цитирования: Мельникова М.А., Таксанц М.В., Голованова И.В., Мельников Д.М. Применение математического моделирования в аддитивных технологиях для топологической оптимизации // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 8–16. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-8-16

Mathematical modeling in additive technologies used for topological optimization

Maria A. Melnikova¹, PhD. Eng.
Marina V. Taxants², senior lecturer
Irina V. Golovanova³, Cand. Sc. Education
Dmitry M. Melnikov⁴, PhD. Eng.

^{1,2,4} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

³ Stavropol Presidential Cadet School, Stavropol, Russian Federation

¹ maria.melnikova@bmstu.ru

² takmar@bmstu.ru

³ Slastenova_I@mail.ru

⁴ melnikovd@bmstu.ru

Abstract. Additive technologies exemplified well in the industry. As a rule, it is technologies called synthesis on a support material (selective laser melting and the like), that make it possible to create products with complex geometries, internal channels, etc. Modern software allows significant expansion in the capabilities of such technologies. One of the directions of the development in this area is the generative artificial intelligence, for example, in case of topological optimization aimed at reducing the weight of the product without loss of strength characteristics. It is based on well-known mathematical models and numerical calculation methods. At the same time, it has now become possible to calculate several models in parallel, depending on the set parameters. At the moment, several algorithms are used for modeling and calculations, gaining the reputation of good results, but at the same time an additional verification of the results obtained before manufacturing, is required. This paper presents the main mathematical models and examines the features for optimization in additive technologies. It discusses examples of model combinations. Using the example of a promising optimization method, the existing limitations and the possibilities of overcoming them are studied. Due to the peculiarities of modeling, one of the tasks is to obtain the results closest to the real ones, therefore, an option for improving the work is proposed, taking into account the real values of experiments. A pattern to understand the specifics of the work of various methods is given, allowing a possible data calculation option depending on the available initial conditions.

Keywords: topological optimization, bidirectional evolutionary design optimization method, additive technologies, artificial intelligence, mathematical modeling, modeling programs

For citation: Melnikova M.A., Taxants M.V., Golovanova I.V., Melnikov D.M. Mathematical modeling in additive technologies used for topological optimization / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 8–16. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-8-16

Введение

Одним из наиболее востребованных и интересных направлений исследований в технике является поиск путей по снижению веса изделий без потери прочностных характеристик, особенно в области авиастроения и космического производства. Решение данной задачи можно найти за счет разработки и использования новых материалов с низкой плотностью, или путем проведения геометрической оптимизации конструкции объекта, в этом случае можно снизить вес деталей от 10 до 75 % [1]. Причём такие особенности обусловлены исключительно возможностями аддитивных технологий. Наиболее предпочтительным методом является синтез на подложке, который позволяет создавать уникальные по структуре и составу объекты со сложной геометрией и внутренними каналами.

Программное обеспечение для аддитивного производства играет ключевую роль в формировании инноваций и стимулировании преобразующей силы технологий 3D-печати. Без наличия цифровых инструментов и современных компьютеров изготовление подобных изделий просто невозможно. Одним из активно развивающихся направлений является генеративный искусственный интеллект (ИИ), представляющий собой самообучающуюся на массивах данных систему, которая может генерировать любые виды данных в ответ на запрос. Его основной особенностью является способность не только анализировать данные, но и предлагать новое

содержимое, которое может варьироваться в зависимости от входных данных и поставленных задач. Наиболее известными системами являются ChatGPT, YandexGPT, которые стали активно применяться с 2022 года и работают за счёт применения самообучения.

Прогнозы [2] показывают активное развитие данного направления в ближайшие 10 лет. Разработчиками основного программного обеспечения для расчётов и оптимизации является США и Франция, при этом США занимает львиную долю рынка генеративного ИИ. В настоящий момент в связи с санкциями многие продукты в России стали недоступны, что подчёркивает необходимость разработки и совершенствования отечественного ПО.

Распространение ИИ и использование генеративного дизайна обусловлено, в том числе, переходом к Индустрии 4.0 [3], т.е. четвёртой промышленной революции, являющейся концепцией Клауса Шваба [4], связанной с цифровизацией на новом уровне: за счёт внедрения индивидуальных решений в производстве. Фактически, необходимо, чтобы сам процесс работы машин стал обособленным без участия человека, однако временно по-прежнему будет сохраняться взаимодействие системы машина-человек для обеспечения обучения машин, а также возможности создания клиентоориентированных и кастомизированных решений.

Благодаря переходу к цифровым двойникам, переводу большинства документации в

электронный вид и реверс инжинирингу, создаются своего рода базы данных, которые могут использоваться в дальнейшем для обучения ИИ с целью оптимизация форм и геометрии изделий. Благодаря генеративному дизайну можно быстро просчитывать различные варианты технологий, методы обработки и режимы, создавая бесконечное количество вариантов нестандартных решений, сложных, в том числе бионических форм.

Несмотря на сложность системы очевидно, что в основе лежат известные математические модели и алгоритмы, которые нашли своё применение в современных программах. Понимание особенностей новых сфер моделирования, их принципов и ограничений является ключевым фактором для оценки адекватности получаемых результатов.

Методики топологической оптимизации конструкций

Стандартные методы проектирования основаны на итерационном цикле: «моделирование – анализ», а при генеративном проектировании «моделирование – анализ – синтез новой структуры – верификация». На данный момент существует четыре направления генеративного дизайна [5]: синтез формы, оптимизация поверхностей и структуры трёхмерных решёток, оптимизация топологии и трабекулярные структуры. С точки зрения машиностроения наибольший интерес представляет топологическая оптимизация, которая даёт мгновенный эффект как в отношении экономии, так и улучшения характеристик продукции и производительности. Топологическая оптимизация в аддитивных технологиях предполагает использование различных математических моделей и методов для оптимального распределения материала в заданном объеме при учете дополнительных факторов, таких как механические нагрузки, ограничения на деформацию, производственные возможности и т.д. Стоит учитывать, что подобные решения во многом возможны именно благодаря технологиям послойного синтеза изделий.

Рассмотрим некоторые из ключевых методов и моделей, применяемых в этой области:

– метод конечных элементов (МКЭ) – это один из основных методов численного моделирования физических сред. МКЭ разбивает

исследуемую область любой геометрии на отдельные элементы, внутри которых сложные представления исследуемых зависимостей заменяются простыми линейными уравнениями. Добавление ограничений к формулировке задачи с целью повышения технологичности является активной областью исследований.

– градиентные методы основываются на формулировании некоторой функции цели и нахождения ее экстремума, помогают быстро находить оптимальные конфигурации материала, учитывая заданные ограничения и условия;

– методы множителей Лагранжа используются для решения задач оптимизации с ограничениями. Эти методы позволяют учитывать различные производственные и эксплуатационные ограничения при оптимизации формы и структуры деталей. Множители Лагранжа используются для обеспечения выполнения всех заданных ограничений и условий при оптимизации конструкции;

– метод плотностной интерполяции (SIMP) – первая техника оптимизации, один из наиболее популярных подходов в топологической оптимизации. Он основывается на концепции интерполяции плотности материала внутри каждого конечного элемента, где плотность может варьироваться от 0 (пустое пространство) до 1 (полностью заполненный материал). Этот метод позволяет определить оптимальную топологию конструкции, удаляя избыточный материал из областей с низким напряжением и добавляя материал в области с высоким напряжением;

– методы на основе топологических производных используются для определения чувствительности функции цели к изменению топологии. Эти методы помогают определять, где и как должны быть внесены изменения в структуру для улучшения характеристик;

– эволюционные алгоритмы (ESO, BESO), например, генетические алгоритмы и алгоритмы роя частиц, имитируют процессы естественной эволюции и коллективного поведения для поиска оптимальных решений в задачах с большим числом переменных и сложными зависимостями;

– мультидисциплинарная оптимизация охватывает методы, которые учитывают несколько различных дисциплин одновременно (например, механика, термодинамика, акустика

и др.), что особенно важно в аддитивных технологиях, где конечный продукт должен соответствовать множеству требований.

Эти методы и модели в совокупности позволяют эффективно решать задачи топологической оптимизации в аддитивных технологиях, обеспечивая создание легких, прочных и функциональных изделий. Наиболее распространёнными методами оптимизации считаются SIMP, ESO и BESO.

Результаты и обсуждения методов оптимизации конструкций

Разнообразие методов оптимизации позволяют осуществлять различные расчёты, которые производители программного обеспечения интегрируют в свои линейки программ. Так, модули оптимизации топологии встраиваются в различные системы, такие как OptiStruct от Altair Hyper-Works, а также модуль SIMULIA Tosca, применяемый в Abaqus, ANSYS. Наиболее популярными онлайн-сервисами для генеративного дизайна являются: Poster Generator, ShadowDraw, Paper Quilling Art Generator, Adaptiff, Hatchful. CogniCAD, Coldstream, MSC APEX, а лучшими программами и сервисами для генеративного дизайна являются: Fusion 360, NX от Siemens, Creo PTC, Ansys Discovery, CATIA. К сожалению, на данный момент, доступ к большинству программ ограничен.

Наиболее распространённым является метод SIMP, который заключается в создании поля виртуальной плотности, представляющей аналог некоторой реальной характеристики объекта, при этом каждому элементу в сетке конечных элементов приписывается переменная плотность, которая может принимать значения между 0 (пустое пространство) и 1 (полное заполнение материала).

При этом вводится некоторый параметр (коэффициента штрафа) p , который уменьшает вклад элементов с промежуточными плотностями в общее решение. При таком штрафовании промежуточных значений их использовать не выгодно. Параметр p (обычно $p > 1$), меняется при различных вариантах решения и чем выше его значение, тем меньше вероятность, что объекты будут иметь промежуточную плотность, отличную от 0 или 1.

Приведем пример:

– для функции жесткости: $E(x) = E_0 x^p$, где $E(x)$ – жесткость материала в элементе; E_0 – жесткость материала в полностью заполненном состоянии; x^p – переменная плотности;

– для функции затрат (минимизируемая цель): $C = \sum_{e=1}^N (x_e^p u_e^T k_e u_e)$, где C – общая деформация конструкции; x_e – плотность элемента e ; u_e – вектор перемещений в элементе e ; k_e – жесткостная матрица элемента.

Одной из наиболее распространённых программ является отдельный модуль Altair Inspire, в котором используется совокупность градиентных методов, методов Лагранжа, полостной интерполяции и МКЭ, позволяющий эффективно решать задачи топологической оптимизации, обеспечивая создание конструкций, соответствующих всем заданным требованиям и ограничениям.

Технологии не стоят на месте и в настоящее время интенсивно исследуются и развиваются новые методы, такие как Evolutionary Structural Optimization (ESO) – эволюционная оптимизация конструкций и Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) – двунаправленная эволюционная оптимизация конструкций [6].

Метод ESO заключается в поэтапном удалении неэффективно используемого материала. Индикатором неэффективного использования материала является низкий уровень напряжений (или деформаций) в той или иной части конструкции.

Таким образом, отдельные элементы конечно-элементной модели будут удалены, исходя из условия:

$$\sigma_e < \sigma_{cut} \rightarrow x_e = 0,$$

где σ_e – напряжение в элементе; σ_{cut} – пороговое значение напряжения для удаления.

В идеале уровень напряжений в конструкции должен быть одинаковым, близким к предельному, но безопасному значению [7]. Анализ конечных элементов и их удаления может циклически повторяться с использованием одного и того же порогового значения σ_{cut} до достижения устойчивого состояния, т.е. отсутствия элементов, удовлетворяющих этому порогу удаления. Затем критерий отбраковки может быть увеличен и цикл анализа запускается

снова до достижения нового стационарного состояния. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнут желаемый результат [8, 9]. Этот метод используется, например, в программах Altair OptiStruct и ANSYS.

ESO имеет простой алгоритм реализации, что позволяет легко решать задачи оптимизации топологии конструкций даже с участием сложных физических процессов. По мере удаления элементов в итерационном процессе объем вычислений снижается, уменьшая вычислительную трудоёмкость задачи, что особенно важно для 3D-объектов. Однако метод ESO в ряде случаев не позволяет получать оптимальные решения, из-за того, что в нем не предусмотрена возможность восстановления материала, удалённого на ранних итерациях [8].

Для устранения этого недостатка был разработан метод BESO (метод двунаправленной эволюционной оптимизации конструкций), который используется, например, в программных продуктах Altair Inspire и ABAQUS.

Метод BESO позволяет одновременно удалять и добавлять материал в области проектирования [8, 10], что делает его более гибким и способным находить лучшие решения. Количество удаляемых и добавляемых элементов на каждой итерации определены двумя независимыми друг от друга параметрами: отношением удаления и отношением включения [11, 12].

Основные формулы для добавления и удаления материала:

$$\Delta V = \alpha \cdot V_{total},$$

где ΔV – объем добавленного или удалённого материала; α – параметр, определяющий долю объема, которая изменяется на каждой итерации; V_{total} – полный объем материала. При этом обновление плотности элементов будет рассчитываться исходя из соотношения:

$$x_e^{new} = \min(\max(x_e^{old} + \Delta x_e, 0), 1),$$

где Δx_e – изменение плотности элемента, которое зависит от локальных условий в конструкции.

Перспективным признан метод под названием ESO-SIMP, который представляет

собой гибрид подходов ESO и SIMP, где используется пошаговое удаление материала (как в ESO) вместе с созданием поля некоторой виртуальной плотности (как в SIMP). Идея в том, чтобы избежать резких изменений структуры и плавно удалять/добавлять материал. Материал обновляется по методу ESO, но с использованием функции плотности:

$$E(x_e) = E_0 \cdot x_e^p.$$

С дальнейшим применением стратегии ESO:

$$\sigma_e < \sigma_{cut} \rightarrow x_e=0.$$

Разница между методами ESO-SIMP и SIMP – в ограничении объема [13]. SIMP использует непрерывное представление плотности материала и обрабатывает промежуточные значения плотности, что приводит к более гладкой оптимизированной структуре, при этом методе сохраняются и участвуют в расчете все элементы системы. Этот метод использует стратегию ESO для удаления элементов. Таким образом, в процессе оптимизации должен контролироваться реальный общий объем всех оставшихся элементов [8].

Понимание быстродействия различных методов топологической оптимизации является важным параметром при их реализации, его график зависимости представлен на рис. 1. Он был построен на основе гипотетических данных, которые иллюстрируют возможное поведение различных методов топологической оптимизации в зависимости от сложности задачи. Это не реальные экспериментальные данные, а скорее пример, показывающий общие тенденции, которые можно ожидать при использовании данных методов:

– МКЭ: предполагается, что время расчета экспоненциально возрастает с увеличением сложности задачи, так как этот метод часто требует детализированного анализа каждой части модели.

– SIMP: показывает рост времени расчета, но не такой резкий, как у МКЭ, поскольку метод базируется на оптимизации плотности материала и может быть более эффективным в некоторых случаях.

– BESO: предполагается еще более высокая сложность и потребность во времени,

особенно на задачах с множеством переменных и сложными зависимостями. Методы множителей Лагранжа: предполагается более линейный рост времени расчета, что делает их более подходящими для задач средней сложности.

Можно отметить, что метод конечных элементов (МКЭ) демонстрирует экспоненциальный рост времени расчета с увеличением сложности задачи. Метод плотностной интерполяции (SIMP) также требует значительного

времени при высокой сложности задач, но чуть менее требователен, чем МКЭ. Эволюционные алгоритмы (BESO) показывают наибольшую сложность и требуют самого большого времени расчета для сложных задач. Методы множителей Лагранжа обладают более линейным ростом времени расчета, что делает их более эффективными для задач со средней сложностью. Этот график помогает визуально оценить, какие методы могут быть наиболее подходящими для задач разной сложности.

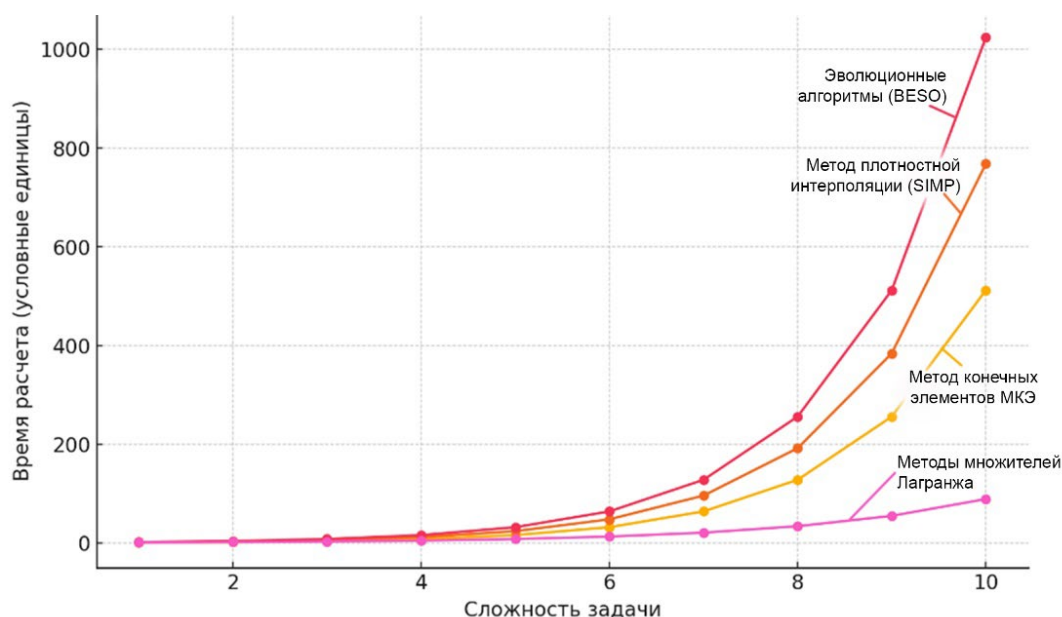


Рис. 1. Оценочный график производительности методов топологической оптимизации

Fig. 1. Evaluation graph of the topological optimization methods performance

Несмотря на все преимущества существующих методов, есть и ряд проблем при использовании генеративного проектирования:

- генеративная модель создает только один результат – конечное решение той или иной степени сложности. Эта особенность резко сужает пространство возможных решений;

- существующее программное обеспечение позволяет получить разнообразную геометрию, но не готово со стопроцентной вероятностью гарантировать работоспособность того или иного исполнения детали;

- требуются сложные алгоритмы расчета критерия оптимизации с большим объемом первичной конструкторско-технологической информации, что возможно только для хорошо проработанных объектов

исследования, и на сегодняшний момент для узкого спектра технологий;

- методы оптимизации имеют схожие трудности: схема оптимизированной модели имеет разрывы сплошности и несвязанные «островки» материала. Существует зависимость результата расчета от сеточного разбиения, т.е. использование различных конечных элементов сеток приводит к различным «оптимальным» топологиям с учётом зон большей и меньшей нагруженности [14].

Диаграмма принятия решений представлена на рис. 2, которая помогает выбрать метод топологической оптимизации в зависимости от цели оптимизации, доступных ресурсов и сроков выполнения проекта в том случае, если: задача связана со сложной геометрией, рекомендуется использовать Метод плотностной интерполяции

(SIMP); требуется высокая точность, стоит выбрать Метод конечных элементов (FEM); ресурсы ограничены, лучше использовать Методы множителей Лагранжа; ресурсов достаточно, можно применить Эволюционные алгоритмы (BESO); при жестких временных рамках эффективен Метод множителей Лагранжа; при гибких сроках предпочтителен BESO.

Несмотря на достаточную изученность методов математического моделирования и численных методов расчёта, для оптимизации изделий, их вариаций, остаётся открытым вопрос нехватки лабораторной и экспериментальной информации для изготовления полностью функциональной детали, работающей в условиях многоциклового нагружения на протяжении нескольких лет. Для этого требуется информация по усталостной прочности, её эксплуатационным

характеристикам при работе совместно с другими деталями в сборке.

На данный момент уже накоплен огромный опыт по разным эксплуатационным нагрузкам деталей известной конструкции, образующим так называемую схему нагружения, которая и используется при проектировании новой аддитивно-ориентированной конструкции детали. В этом случае становится понятным, что оптимально использование программного обеспечения с открытой архитектурой, в том числе для осуществления калибровки условий работы под конкретную установку. Например, FEDOT (Flexible Evolutionary Design of Optimal Trees) – это фреймворк для автоматизированного проектирования сложных композитных моделей, которое предоставляет автоматизированный генеративный дизайн конвейеров машинного обучения для различных реальных задач.



Рис. 2. Диаграмма принятия решений

Fig. 2. Decision diagram

Развитие вычислительных мощностей и алгоритмов искусственного интеллекта будут значительно расширяться, методы машинного обучения и ИИ для автоматизации и улучшения процессов оптимизации уже являются частью программного обеспечения. В перспективе это обеспечит сплошной рабочий процесс от проектирования до производства.

На основании предложенной диаграммы и оценки быстродействия систем можно сделать

вывод о возможности расширения ПО и создания новых численных методов для решения подобных задач с учётом особенностей имеющихся, а набор базы данных с экспериментами и создание программ с открытым кодом позволит быстрее адаптировать системы под конкретные задачи.

Таким образом, генеративный дизайн и искусственный интеллект в целом позволяют автоматически генерировать множество вариантов

конструкций на основе заданных критериев и ограничений. Применение различных методов, их комбинации и новые разработки ведут к повышению качества получаемых решений.

ВЫВОДЫ

Адаптация топологической оптимизации для 3D-печати является важной частью развития программного обеспечения под различные задачи аддитивного производства и в нашей стране это направление особенно важно. Были рассмотрены различные методы топологической оптимизации и проведен их анализ, предложена диаграмма выбора метода для решения различных задач. Рассмотрены проблемы, связанные с отсутствием корреляции математических расчётов и экспериментальных данных. Решением этой проблемы в будущем может стать, например, создание общей базы экспериментальных данных различных предприятий и фирм и разработка ПО с возможностью внесения корректировок под конкретную задачу на базе открытого кода, что расширит возможности не только отдельных предприятий, но и промышленности в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Рынок** аддитивных технологий развивается семимильными шагами // Коммерсантъ URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6366117> (дата обращения: 22.03.2025)
2. **U.S. Additive Manufacturing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software), By Printer Type (Desktop, Industrial), By Technology, By Software, By Application, By Vertical, By Material, And Segment Forecasts, 2023 - 2030** // Grand View Research URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/us-additive-manufacturing-market-report#> (дата обращения: 22.03.2025).
3. **Фомина А. В., Мухин К. Ю.** Индустрия 4.0. Основные понятия, преимущества и проблемы // Экономический вектор. 2018. № 3. С. 34–36.
4. **Шваб К., Дэвис Н.** Технологии Четвертой промышленной революции. - Top Business Awards изд. Москва: Бомбора, 2022. 320 с.
5. **The New Age of Highly Efficient Products Made with Generative Design** // engineering.com URL: <https://www.engineering.com/the-new-age-of-highly-efficient-products-made-with-generative-design/> (дата обращения: 22.03.2025).
6. **Брюхова К. С., Максимов П. В.** Алгоритм топологической оптимизации на основе метода ESO //

Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №9 (51). С. 16–18.

7. **Jikai Liu Yongsheng Ma.** A survey of manufacturing-oriented topology optimization methods // Advances in Engineering Software. 2016. № 100. P. 161–175.

8. **Башин К. А., Торсунов Р. А., Семенов С. В.** Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. №4 (51). С. 51–61.

9. **Оганесян П.А., Шевцов С.Н.** Оптимизация топологии конструкций в пакете ABAQUS // Известия Самар. науч. центра РАН. 2014. Т. 16. С. 543–549.

10. **Xia L., Xia, Q., Huang, X.** Bi-directional Evolutionary Structural Optimization on Advanced Structures and Materials: A Comprehensive Review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2018. №25. P. 437–478.

11. **Ghabraie K. A.** An improved soft-kill BESO algorithm for optimal distribution of single or multiple material phases // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2015. №52. P. 773–790.

12. **Jiao H., Zhou, Q., Fan, S., Li, Y.** A New Hybrid Topology Optimization Method Coupling ESO and SIMP Method // Proceedings of China Modern Logistics Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. Berlin: Springer, 2015. P. 373–384.

13. **Sigmund O., Maute, K.** Topology optimization approaches // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. №48. P. 1031–1055.

14. **Козик А.М., Гуж Т.С., Ильичев В.А.** Современные тенденции в вопросе оптимизации металлических конструкций // Молодеж. науч. форум: техн. и матем. науки. 2017. № 2(42). С. 51–57.

15. **Welcome to FEDOT's documentation!** // FEDOT URL: <https://fedot.readthedocs.io/en/latest/#> (date of access: 03/22/2025)

REFERENCES

1. The market of additive technologies is taking seven-league steps // Kommersant URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6366117> (date of access: 03/22/2025)
2. **U.S. Additive Manufacturing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software), By Printer Type (Desktop, Industrial), By Technology, By Software, By Application, By Vertical, By Material, And Segment Forecasts, 2023 - 2030** // Grand View Research URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/us-additive-manufacturing-market-report#> (date of access: 03/22/2025)
3. **Fomina A.V., Mukhin K. Y.** Industry 4.0. Basic concepts, advantages and problems // The Economic vector. 2018, No. 3, pp. 34–36.
4. **Schwab K., Davis N.** Technologies of the Fourth Industrial Revolution. - Top Business Awards. Moscow: Bombora. 2022, 320 p.
5. **The New Age of Highly Efficient Products Made with Generative Design** // engineering.com URL:

<https://www.engineering.com/the-new-age-of-highly-efficient-products-made-with-generative-design/> (date of access: 03/22/2025)

6. Bryukhova K. S., Maksimov P. V. Topological optimization algorithm based on the ESO method // International Scientific Research Journal. 2016, No. 9 (51), pp. 16-18.

7. Jikai Liu, Yongsheng Ma. A survey of manufacturing-oriented topology optimization methods // Advances in Engineering Software. 2016, No. 100, pp. 161–175.

8. Bashen K. A., Tursunov R. A., Semenov S. V. Topology optimization methods for structures used in the aerospace industry // Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. 2017, No. 4 (51), pp. 51–61.

9. Oganessian P.A., Shevtsov S.N. Topology designs optimization in ABAQUS package // Izvestia of Samara Sci. Center of the Russian Academy of Sciences. 2014, vol. 16, pp. 543–549.

10. Xia, L., Xia, Q., Huang, X. Bi-directional Evolutionary Structural Optimization on Advanced Structures and

Materials: A Comprehensive Review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2018, No.25, pp. 437–478.

11. Ghabraie K. A. An improved soft-kill BESO algorithm for optimal distribution of single or multiple material phases // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2015, No.52, pp. 773–790.

12. Jiao, H., Zhou, Q., Fan, S., Li, Y. A New Hybrid Topology Optimization Method Coupling ESO and SIMP Method // Proceedings of China Modern Logistics Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. Berlin: Springer, 2015. pp. 373–384.

13. Sigmund, O., Maute, K. Topology optimization approaches // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013, No 48, pp. 1031–1055.

14. Kozik A.M., Guzh T.S., Ilyichev V.A. Modern trends in the optimization of metal structures // Youth. scientific. Forum: tech. and maths science. 2017, No. 2(42), pp. 51–57.

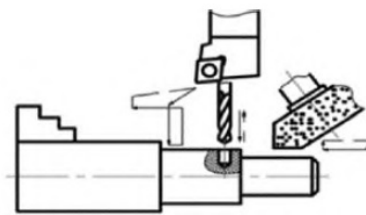
15. Welcome to FEDOT's documentation! // FEDOT URL: <https://fedot.readthedocs.io/en/latest/#> (date of access: 03/22/2025)

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 11.11.2024; одобрена после рецензирования 16.01.2025; принята к публикации 16.02.2025.

The article was submitted 11.11.2024; approved after reviewing 16.01.2025; accepted for publication 16.02.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №4 (166). С.17-23.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №4 (166). P.17-23.

Научная статья

УДК 621.921

doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-17-23

Эффективность импрегнированного абразивного инструмента при обработке деталей подшипников

Олег Викторович Душко¹, д.т.н.

Сергей Анатольевич Крюков², д.т.н.

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

¹ ovd28@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3982-1899>

² sf-visteh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9558-0452>

***Аннотация.** В машиностроительном производстве значимое место занимает технология шлифования деталей подшипников. Особенно актуальна эта тема в настоящее время, так как к этому процессу предъявляются повышенные требования, как по производительности, так и по качеству готовых изделий. Эффективность финишной обработки деталей подшипников в современном высокотехнологичном производстве обуславливается применением высокоэффективного абразивного инструмента со стабильными эксплуатационными характеристиками. Абразивный инструмент на керамической связке подвержен значительному влиянию внешней среды, особенно при работе с водными смазочно-охлаждающими жидкостями (СОЖ), которые в значительной степени изменяют физико-механические свойства шлифовальных кругов, снижая его твердость, прочность и, как следствие, ведут к снижению его эксплуатационных характеристик. Одним из эффективных направлений совершенствования абразивного инструмента можно считать введение в его поры твердых смазок (импрегнирование), улучшающих условия шлифования и качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей подшипников. Проведенные авторами лабораторные исследования на базе НТЦ «ВНИИАШ» и изученный опыт промышленного применения импрегнированного инструмента на предприятиях по производству подшипников показывает его эффект только в случае равномерной пропитки всего объема абразивного инструмента и обеспеченности равномерности заполнения его порового пространства. По результатам проведенных исследований нами установлена возможность производительного, качественного импрегнирования абразивного инструмента серой способом свободного капиллярного поднятия по порам круга. Применение импрегнированного абразивного инструмента на предприятиях корпорации ЕПК позволяет повысить качество обработки деталей подшипников и снизить расход абразивного инструмента в 1,1 – 1,8 раза.*

Ключевые слова: шлифование, термообработка, импрегнирование, абразивный инструмент, твердость, пропитка

Для цитирования: Душко О.В., Крюков С.А. Эффективность импрегнированного абразивного инструмента при обработке деталей подшипников // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 17–23. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-17-23

The impregnated abrasive tool potency in mechanical tooling of bearing parts

Oleg V. Dushko¹, D.Eng.

Sergey A. Kryukov², D.Eng.

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

¹ ovd28@mail.ru

² sf-visteh@mail.ru

Abstract. The technology of grinding bearing parts holds a significant place in machinery production. This topic is particularly relevant at the present time, as there are raised requirements for this process, both in terms of productivity and the quality of finished products. The efficiency of finishing bearing parts in modern high-tech manufacturing is determined by the use of highly efficient abrasive tools with stable performance characteristics. Ceramic-bonded abrasive tools are subject to significant environmental effects, especially when working with water-based cooling lubricants (coolants), which significantly alter the physical and mechanical properties of grinding discs, reducing its hardness and strength and, resulting in a decrease in its performance characteristics. One of the effective ways to improve an abrasive tool can be considered the introduction of solid lubricants (impregnation) into its pores, which improve the grinding conditions and the quality of the surface layer of the machined bearing parts. The laboratory studies carried out by the authors on the basis of the Scientific and Technical Center "VNIASH" and considered experience of industrial use of impregnated tools in bearing manufacturing enterprises show its effect only in the case of uniform impregnation of the entire abrasive tool and ensuring uniform filling of its pore space. Based on the results of our research, we have found the possibility of productive, high-quality impregnation of abrasive tools with sulfur using the method of free capillary ascent along the pores of the disc. The use of impregnated abrasive tools at the enterprises of the EPC corporation makes it possible to improve the quality of processing bearing parts and reduce the consumption of abrasive tools by 1,1 – 1,8 times.

Keywords: grinding, heat treatment, impregnation, abrasive tool, hardness

For citation: Dushko O.V., Kryukov S.A. The impregnated abrasive tool potency in mechanical tooling of bearing parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 17–23. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-17-23

Введение

Выбор абразивного инструмента для обработки деталей подшипников следует рассматривать как совокупность физико-механических свойств и химического сходства абразива и металла [1]. Стойкость круга и его твердость оказывают определяющее влияние на качество обрабатываемых деталей подшипников.

Многочисленные исследования [2 – 5] показали, что основным разрушающим фактором работающего круга являются тангенциальные напряжения в отверстиях круга: под действием центробежной силы в инструменте возникают напряжения, которые при наличии дефектов приводят к его разрыву. Кроме этого, абразивный инструмент на керамической связке подвержен значительному влиянию внешней среды, особенно при работе с водными СОЖ, которые заметно изменяют физико-механические свойства шлифовальных кругов, снижая их твердость, а это приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик инструмента.

Одним из приоритетных направлений решения этих проблем можно считать введение в поры абразивного инструмента твердых смазок [6, 7], улучшающих условия шлифования и качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей подшипников. Проведенные нами лабораторные исследования и изученный

опыт промышленного применения импрегнированного инструмента на предприятиях по производству подшипников показывают положительный эффект только при условии равномерности пропитки по всему объему абразивного инструмента и обеспеченности равномерности заполнения его порового пространства. Для достижения обозначенного выше эффекта нами была разработана и запатентована новая технология импрегнирования шлифовальных кругов на керамической связке. В её основе лежит предварительная термообработка, позволяющая очистить поровое пространство инструмента и, тем самым, обеспечить быструю и эффективную пропитку. Для подтверждения эффективности инструмента, импрегнированного по предлагаемой технологии, были проведены сравнительные лабораторные исследования.

Целью данного исследования является повышение эффективности шлифования деталей подшипников за счет применения предварительно термообработанного и импрегнированного абразивного инструмента на керамической связке.

Материал и методы исследования

На предприятиях корпорации ЕПК операции абразивной обработки в технологических процессах составляют до 40...50 %. В

этой связи повышение производительности и качества абразивной обработки является актуальной задачей в современном машиностроении. Повышение эксплуатационных свойств абразивного инструмента на керамической связке (основной вид этого инструмента) используются различные пути. На подшипниковых предприятиях широкое применение получила практика пропитки абразивного инструмента на керамической связке различными химическими веществами [8]. В качестве твердых смазок используется сера, сульфированный стеарин, тонкодисперсные порошки алюминия и дисульфида молибдена, бакелитовый лак, которые обеспечивают исключение прижогов при финишной обработке поверхности, повышение стойкости применяемого абразивного инструмента вплоть до полного его износа, снижение шероховатости обработанной поверхности. Известно, что все подшипниковые заводы шлифуют детали подшипников из закаленной легированной стали марок, например, сталь ШХ15. Для её обработки, на операциях шлифования упорных бортов и дорожек колец подшипников, предприятия ЕПК используют круги из электрокорундовых материалов на плавящейся керамической связке твердостью $J-L$, импрегнированные расплавом серы.

Следует отметить, что сера активный минерал, имеющий высокие антифрикционные свойства за счет образования при шлифовании на поверхности металла значительное количество сульфидов железа, которые обладают хорошей смазывающей способностью. А также сера имеет низкую стоимость. Технология импрегнирования доступна для любого металлообрабатывающего производства, а на абразивных заводах ее реализация еще менее затратная. Импрегнированный серой инструмент обладает повышенными эксплуатационными свойствами, как при шлифовании, так и при доводочных операциях. Однако в технологическом процессе пропитки абразивного инструмента крайне сложно добиться равномерности распределения импрегнатора по всему объему. Непропитанные участки в процессе эксплуатации инструмента вызывают снижение качества обработанной поверхности металла и, как следствие, ведут к возникновению прижога.

Также недостаточно равномерно заполненный серой абразивный инструмент не обеспечивает высокую эффективность при шлифовании, при этом не удается обеспечить стабильность качества обработки деталей подшипника, что исключает применение такого инструмента на станках с ЧПУ, где требуется стабильные показатели его работы.

Проведенные нами исследования на кругах шлифовальных керамических электрокорундовых, пропитанные серой без удаления избытка импрегнатора (степень заполнения $0,2...0,25$) показали высокую засаливаемость, рост температуры в зоне контакта инструмент – деталь, как следствие возникновения прижогов, а по совокупности показателей худшею работу, чем непропитанные. Степень заполнения импрегнатором абразивного инструмента определена, как отношение массы импрегнатора к общей массе инструмента.

Для обеспечения равномерности пропитки абразивного инструмента на керамическом связующем нами разработана и запатентована технология импрегнирования [9, 10] представленная на рис. 1, которая включает в себя несколько этапов: термообработку абразивного инструмента на керамической связке при температуре $450...500$ °С и выдержкой $20...30$ мин для удаления адсорбционных загрязнений в поровом пространстве круга; приготовление импрегнатора путем расплавления серы; пропитывание абразивного инструмента путем его погружения в расплав серы с последующим охлаждением на воздухе.

Последним этапом заявленной технологии является контроль качества, включающий в себя: визуальный контроль, проверку на неуравновешенность, испытания на разрыв и определение равномерности пропитки. Такая технология импрегнирования в разы увеличивает адгезию серы к поверхности инструмента, повышает степень и коэффициент пропитывания, а также уменьшает дисбаланс кругов почти в 2 раза по сравнению с заводской технологией. Такой способ импрегнирования позволяет достичь оптимальной равномерности пропитки и повышения эксплуатационных свойств инструмента.

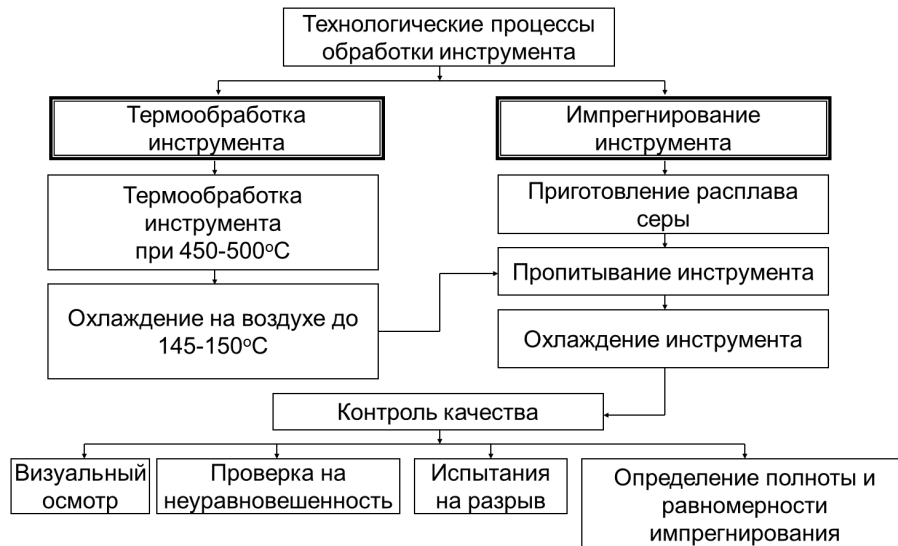


Рис. 1. Схема импрегнирования

Fig. 1. Impregnation scheme

Для проверки выводов о влиянии термообработки и импрегнирования абразивного круга на изменение составляющих сил резания P_y и P_z , характеризующих динамику процесса шлифования стали ШХ 15, были проведены лабораторные эксперименты.

Исследования проводились на операциях шлифования дорожек качения внутренних колец роликоподшипников на станке SIW-3M. Режимы шлифования: скорость круга $v_{кр} = 35$ м/с; продольная скорость стола $v_{ст} = 12$ м/мин; подача круга на глубину $t = 0,01$ мм/дв.ход. Шлифование проводилось без применения СОЖ.

Круги подвергались правке перед началом каждого испытания алмазно-металлическим карандашом.

Силы резания P_y (нормальная составляющая сила) и P_z (касательная составляющая сила) замерялись посредством динамометра конструкции НТЦ «ВНИИАШ» ВПИ (филиал) ВолГТУ. Каждый опыт имел продолжительность 20 мин. Опыты повторялись по 5 раз. Полученные экспериментальные данные были обработаны известными методами математической статистики.

Результаты исследования и их обсуждение

Динамика изменения сил резания P_y и P_z от продолжительности шлифования представ-

лена на рис. 2 и 3. На графиках хорошо видны изменения сил резания при работе разными кругами. Круги импрегнированные серой показали сокращение времени стабилизации сил резания в 2,5 раза.

Такой факт позволяет нам говорить о различной степени приработки кругов после их правки, режущей способности абразивных зерен и их затупляемости. Абразивные круги, пропитанные серой имеют, повышение прочности удержания зерна в связке, чем у инструмента без пропитки. В этой связи в первоначальный период работы неимпрегнированных кругов происходит осыпание слабозакрепленных в связке зерен находящихся на режущей поверхности круга по сравнению с пропитанным серой абразивным инструментом. И как следствие сокращение количества абразивного зерна в зоне контакта пары инструмент – деталь, что ведет к растущим нагрузкам на работающие зерна и их более быстрому затуплению и разрушению.

Также наблюдается повышение величины разновысотности зерен в поверхностном слое абразивного круга. Это ведет к увеличению контактной площади связки с обрабатываемой поверхностью детали. Представленные обстоятельства приводят к дополнительному росту сил трения и сил резания.

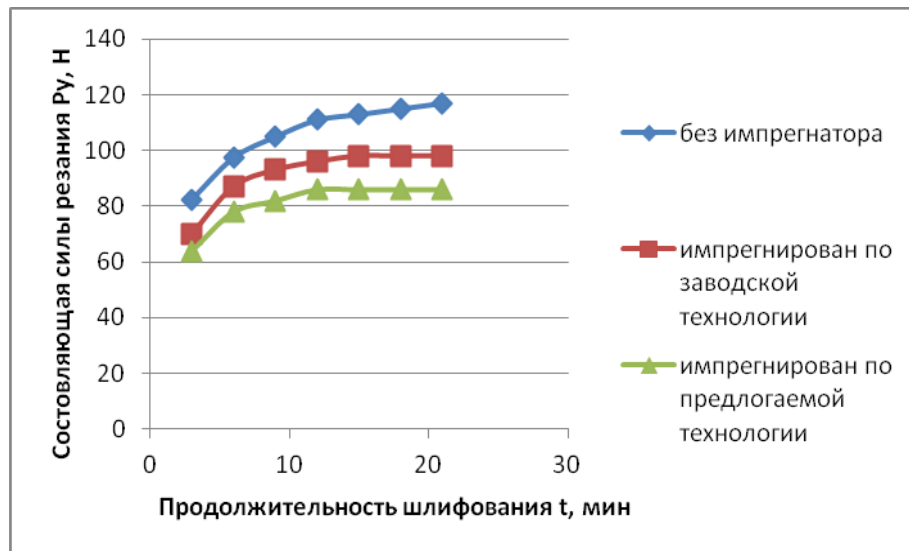


Рис. 2. Изменение силы резания P_y в зависимости от продолжительности шлифования

Fig. 2. Change in cutting tool force P_y depending on the duration of grinding

Как видно из рис. 2 значительное уменьшение силы P_y после шлифования импрегнированным кругом по заводской технологии. Предлагаемый нами инструмент позволяет

более чем на 30 % уменьшить нормальную составляющую силу по сравнению с непропитанным инструментом. Из рис. 3 видно снижение силы P_z соответственно в 1,37 и 1,58 раза.

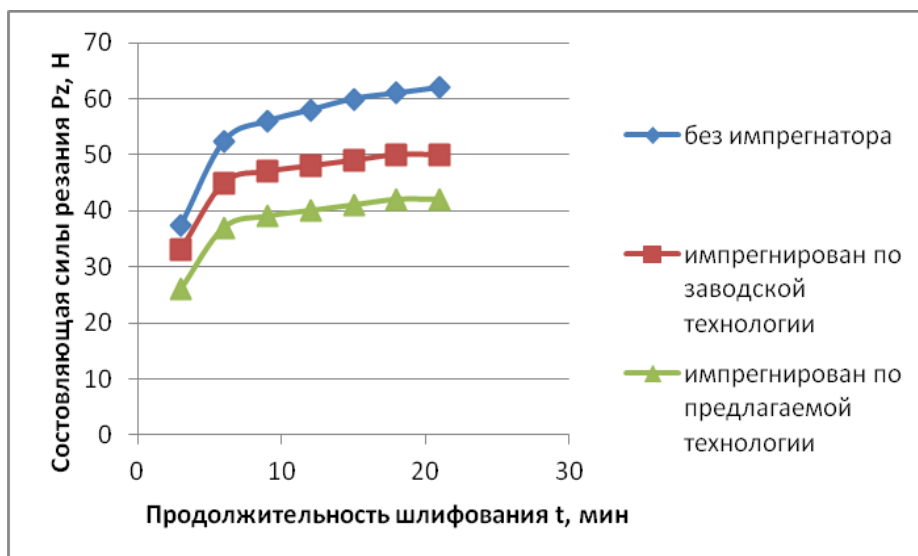


Рис. 3. Изменение силы резания P_z в зависимости от продолжительности шлифования

Fig. 3. Change in cutting tool force P_z depending on the duration of grinding

Уменьшение сил резания при шлифовании импрегнированным инструментом в первую очередь объясняется снижением сил трения за счет физико-химических свойств серы, которая обеспечивает уменьшение прочности поверхностных слоев обрабатываемой поверхности. Такое понижение прочности

позволяет значительно снизить силы резания при шлифовании в пределах 1,1 – 1,3 раза. Действие любого вида смазочно-охлаждающих технологических сред позволяют начать резание на меньшей глубине, что также способствует уменьшению динамических нагрузок на

абразивные зерна в зоне контакта и снижению силы резания.

Более значительное снижение сил резания (на 10...15 %) при работе абразивным инструментом, пропитанным по нашей технологии в сравнении с кругом, импрегнированным по заводской технологии без предварительной термообработки. На наш взгляд это связано со значительным влиянием термообработки на физико-механические свойства абразивного зерна. Термообработка позволяет повысить прочность, самозатачиваемость, микрохрупкость зерна. А сочетание положительных качеств термообработки и эффективного импрегнирования позволяют повысить и показатели качества абразивного инструмента в целом, что также ведет к дополнительному снижению сил резания. Предварительная термообработка инструмента в температурном диапазоне 450...500 °С позволяет обеспечить равномерность заполнения порового пространства круга серой и тем самым обеспечить стабильность его эксплуатационных показателей.

Заключение

В результате проведенных исследований сделан вывод об эффективности шлифования импрегнированным абразивным инструментом стали ШХ15, прошедшим предварительную термическую обработку по предложенной нами технологии. Равномерная пропитка абразивного круга в значительной мере оказывает влияние на силы резания и, как следствие, на динамику процесса шлифования через кинематические и структурно-механические свойства инструмента.

Сравнительные результаты экспериментов подтвердили эффективность предлагаемого подхода к пропитке электрокорундового абразивного инструмента на керамической связке. Абразивный инструмент, импрегнированный по нашей технологии, показал более стабильную работу при шлифовании, а также значительно увеличилась режущая способность, стойкость круга, коэффициент шлифования. Скорость изнашивания предлагаемого инструмента в 1,25 раза меньше чем у абразивных кругов, пропитанных по заводской технологии. Это косвенно подтверждает наши выводы об увеличении количества режущих

зерен, участвующих в процессе шлифования. За счет этого уменьшится толщина среза единственным зерном, как следствие уменьшение амплитуды силы резания, сил трения, уменьшения температуры в зоне контакта инструмент-деталь.

Анализ качества обработанных поверхностей показал полное отсутствие прижогов при шлифовании импрегнированным серой инструментом, а также уменьшение в 1,3 раза по сравнению с прототипом шероховатости поверхности.

Существенное снижение сил резания доказывает эффективность импрегнированного абразивного инструмента при обработке деталей подшипников на примере шлифования стали ШХ 15, как наиболее распространенную на предприятиях ЕПК.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соколова И.Д., Беккель Л.С., Потемкин В.Ю. Исследование возможностей совершенствования абразивного инструмента // Инновационная наука. 2015. Т. 2. № 6 (6). С. 85–87.
2. Белухин Р.А., Вершинин Я.В., Костина А.В. Высокоструктурный абразивный инструмент при шлифовании подшипниковой стали ШХ15 / В сборнике: Научно-практическая конференция студентов ВПИ (филиал) ВолгГТУ «Наука молодых: идеи, результаты, перспективы». 2016. С. 51–53.
3. Гришин Р.Г., Носов Н.В., Сальников И.М., Гордиенко Я.М., Ладыгин Р.В. Разработка методики расчета шероховатости поверхности при мехобработке абразивным инструментом / Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2022. № 2 (77). С. 3–9.
4. Багайсков Ю.С. Особенности изготовления высокоструктурных равномернопористых абразивных инструментов на керамической связке/ В сборнике: Пром-Инжиниринг. Тр. III междунар. науч.-техн. конф.. 2017. С. 118–120.
5. Мельников В.В. Контроль качества абразивных материалов и инструментов / В сборнике: Россия молодая. Сб. матер. VII Всеросс. науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием. 2015. С. 654.
6. Бутенко В.И., Шаповалов Р.Г. Повышение эффективности финишной обработки поверхностей деталей машин импрегнированием абразивных инструментов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2018. № 1 (44). С. 99–103.
7. Иванов С.В., Алексеев Н.С., Капорин В.А. Влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на составляющие силы резания микропористого покрытия восстановленной детали // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 9 (179). С. 149–156.
8. Митрофанов А.П., Ли В.В. Исследование влияния импрегнирования абразивного инструмента на

состояние поверхностного слоя нержавеющей стали 12X18H10T / Современные научные исследования и инновации. 2018. № 5 (85). С. 11.

9. Патент на изобретение RU 2352451 C1, 20.04.2009. Заявка № 2007122816/02 от 18.06.2007. Способ пропитки абразивного инструмента / Шумячер В.М., Крюков С.А., Славин А.В.

10. Патент на изобретение RU 2354535 C2, 10.05.2009. Заявка № 2007111229/02 от 27.03.2007. Способ пропитки абразивного инструмента / Шумячер В.М., Славин А.В., Крюков С.А.

REFERENCES

1. Sokolova I.D., Bekkel L.S., Potemkin V.Yu. Investigation of the possibilities of improving an abrasive tool/ Innovative science. 2015, Vol. 2. No. 6 (6), p. 85

2. Belukhin R.A. Highly structured abrasive tool for grinding bearing steel SHX15 / Vershinin Ya.V., Kostina A.V. Proceedings: Scientific and practical conference of students of VPI (branch) VolgSTU "Science of the young scientists: ideas, results, prospects". 2016, pp. 51–53.

3. Grishin R.G. Procedure for calculating the surface roughness during grinding with an abrasive tool/ Nosov N.V., Salnikov I.M., Gordienko Ya.M., Ladyagin R.V. Progressive technologies and systems of mechanical engineering. 2022, No. 2 (77), pp. 3–9.

4. Bagaiskov Yu.S. Features high structural high degree of uniformity of the porosity manufacturing of abrasive

tools on ceramic bond/ In the collection: Industrial Engineering. Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference. 2017, pp. 118–120.

5. Melnikov V.V. Quality control of abrasive materials and tools / In the collection: Young Russia. Proc. of the VII-th All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists with international participation. 2015, p. 654.

6. Butenko V.I., Shapovalov R.G. Improving the efficiency of finishing the surfaces of machine parts by impregnating abrasive tools // Bulletin of the Russian State Technical University named after P. A. Solov'yov. 2018, No. 1 (44), pp. 99–103.

7. Ivanov S.V. The influence of grinding modes and characteristics of an abrasive tool on the components of the cutting force of a microporous coating of a restored part / Alekseev N.S., Kaporin V.A. Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2019, No. 9 (179), pp. 149–156.

8. Mitrofanov A.P. The effect of various methods of abrasive impact on the surface layer of 12X18H10T austenitic stainless steel / Li V.V. Modern scientific research and innovations. 2018, No. 5 (85), p. 11.

9. Patent for the invention RU 2352451 C1, 04/20/2009. Application No. 2007122816/02 dated 06/18/2007. The method of impregnation of an abrasive tool / Shumyacher V.M., Kryukov S.A., Slavin A.V.

10. Patent for the invention RU 2354535 C2, 05/10/2009. Application No. 2007111229/02 dated 27.03.2007. The method of impregnation of an abrasive tool / Shumyacher V.M., Slavin A.V., Kryukov S.A.

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

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

Статья поступила в редакцию 10.01.2025; одобрена после рецензирования 11.01.2025; принята к публикации 14.02.2025.

The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 11.01.2025; accepted for publication 14.02.2025.

Научная статья

УДК 621.9.025:620.169.1

doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-24-31

Технология и результаты изучения процесса изменения состояния металлорежущего инструмента

Марина Борисовна Бровкова¹, д.т.н.

Анна Викторовна Купцова², к.ф.-м.н.

Павел Владимирович Купцов³, д.ф.-м.н.

Владимир Васильевич Мартынов⁴, д.т.н.

^{1,4} Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
(ИМАШ РАН), Москва, Россия

^{2,3} Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Саратов, Россия

¹ bmbasar@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1863-0709>

² anna.kuptsova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1991-7620>

³ kupav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2685-9828>

⁴ v-martynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4177-0963>

Аннотация. Представлена технология и результаты изучения с её помощью процесса изменения состояния металлорежущего инструмента на примере инструмента, оснащённого пластиной из твёрдого сплава. Показано, что о скорости изменения состояния можно судить по виду двумерной гистограммы, построенной по данным временных рядов сигналов о колебаниях технологической системы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Наличие на гистограмме паттерна типа «хвост кометы» свидетельствует о высокой скорости изменения состояния, в частности, в ходе приработки инструмента. Для отображения механизма изменения состояния используется кросс-корреляционная кривая, вид которой характеризует силу взаимосвязи между направлениями колебаний. Усиление взаимосвязи является признаком стабилизации состояния и выходом инструмента на стационарный режим работы. Идентификация механизма изменения состояния выполняется с помощью процедуры, основанной на статистической проверке гипотезы о значимости изменения коэффициентов преобразования спектров сигналов о колебаниях по направлениям с помощью *t*-критерия Стьюдента. Результаты идентификации показали, что механизм изменения состояния представляет собой изменение связей и связанностей в технологической системе, что приводит к формированию у неё новых динамических свойств, обеспечивающих снижение сил резания за счет перераспределения сил трения между передней и задней поверхностями инструмента и, как следствие, повышающих устойчивость к возмущениям, создаваемым рабочими процессами. Проведено сравнение подхода, использованного при разработке технологии, с подходами, основанными на построении математической (аналитической или стохастической) модели реальной системы. Обосновано направление практической реализации технологии в программном обеспечении систем ЧПУ для более эффективного решения традиционных задачи управления, в частности, технологической, что будет гарантированно обеспечивать повышение надёжности инструмента.

Ключевые слова: режущий инструмент, пластина, состояние, колебания, двумерная диаграмма, кросс-корреляция, коэффициент преобразования спектра, критерий Стьюдента, технология

Благодарности: материал подготовлен в рамках выполнения научного исследования по гранту Российского научного фонда №20-19-00299.

Для цитирования: Бровкова М.Б., Купцова А.В., Купцов П.В., Мартынов В.В. Технология и результаты изучения процесса изменения состояния металлорежущего инструмента // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-24-31

Technology and results of studying the diversification of the operative conditions of metal cutting tools

Marina B. Brovkova¹, D. Eng.

Anna V. Kuptsova², PhD. Eng.

Pavel V. Kuptsov³, Dr. Sci. in Physics and Mathematics

Vladimir V. Martynov⁴, D. Eng.

^{1,4} Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS),
Moscow, Russia

^{2,3} Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

¹ bmsar@mail.ru

² anna.kuptsova@gmail.com

³ kupav@mail.ru

⁴ v-martynov@mail.ru

Abstract. The technology and the results of its investigation contributing to studying the diversification of the operative conditions of metal cutting tools, are presented as exemplified in a tool equipped with a hard alloy plate. It is shown that the rate of diversification can be judged by the appearance of a two-dimensional histogram constructed from time series of signals indicating fluctuations in the technological system in mutually perpendicular planes. The occurrence of a "comet tail" pattern on the histogram indicates a high rate of diversification of operative conditions, in particular, during the running-in of the tool. To show the dynamics of the diversification, a cross-correlation curve is used, the form of which characterizes the strength of the relationship between the directions of oscillation. This networking proves regulation of operative conditions and the transition to a starting operation in a stationary mode. Diversification dynamics is identified using a procedure based on statistical test of the hypothesis for the significance of changes in the transformation coefficients of the spectra of diverse oscillation signals using the Student's *t*-test. The identification results showed that state diversification dynamics is a change in connections and constraint in the industrial process system, which leads to the formation of new dynamic properties that reduce cutting forces due to the redistribution of friction forces between the front and rear surfaces of the tool and, as a result, increase stability for disturbance resulted from the operating procedure. The approach used in the development of the process design is compared with approaches based on the construction of a mathematical (analytical or stochastic) model of a real system. The direction of practical implementation of the technology in the software of CNC systems is justified for more efficient solution of traditional control tasks, in particular, process tasks, which will ensure an increase in the reliability of the tool.

Keywords: cutting tool, plate, condition, vibrations, two-dimensional diagram, cross-correlation, spectrum transformation coefficient, Student's test, technology

Acknowledgements: the material was prepared as part of a scientific study under the grant of the Russian Science Foundation No. 20-19-00299

For citation: Brovkova M.B., Kuptsova A.V., Kuptsov P.V., Martynov V.V. Technology and results of studying the diversification of the operative conditions of metal cutting tools / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 24–31. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-24-31

Одной из основных задач сохранения конкурентоспособности процессов механической обработки материалов является повышение надёжности режущего инструмента, поскольку именно от него, в основном, зависят показатели производительности, простои оборудования и качество обработки несмотря на то, что доля расходов на него в общей себестоимости произведенной продукции составляет всего несколько процентов. Существуют различные подходы к решению этой задачи [1 – 6], в том числе подходы, основанные на изучении сигналов о колебаниях технологической системы, зарегистрированных в процессе её

функционирования, позволяющие не только раскрыть причины, но и определить направления, при реализации которых повышение надёжности инструмента будет гарантированным [7 – 10].

Рассмотрим один из подходов на примере временных рядов сигналов о колебаниях, зафиксированных при проведении эксперимента, в ходе которого осуществлялось точение заготовки из стали 45 диаметром 60 мм на токарном станке 1К625 со скоростью резания 120 м/мин и подачей 0,34 мм/об резцом, оснащённым твёрдосплавной пластиной Mitsubishi UE6020. Каждый

временной ряд соответствовал одному проходу пластины длиной 300 мм. Общее число проходов составило 15. Кроме этого, после каждого цикла точения, состоящего из трёх проходов, с помощью индикаторной головки с ценой деления 0,01 мм измерялось абсолютное значение размерного износа пластины, и рассчитывалась его скорость (рис. 1).

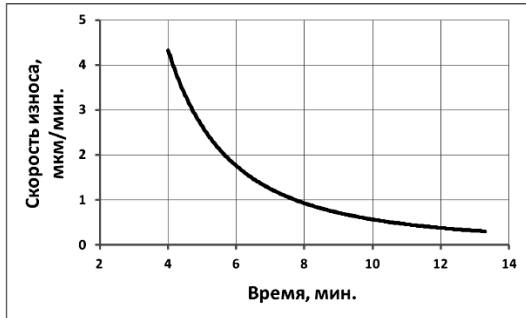


Рис.1. Изменение состояния пластины Mitsubishi UE6020 в ходе эксперимента

Fig.1. Change in the state of the Mitsubishi UE6020 plate during the experiment

Сигналы регистрировались двумя пьезодатчиками, установленными с помощью магнитов на державке пластины по нормали к плоскости резания (координата X) и на резцедержателе в направлении плоскости резания (координата Y). Постоянство скорости резания в

условиях уменьшения диаметра заготовки поддерживалось изменением после каждого цикла точения частоты её вращения в диапазоне 630...1600 мин⁻¹.

Подход к изучению сигналов включал построение двумерных гистограмм (диаграмм, отображающих два ряда данных на одном графике) [11], вычисление коэффициентов кросс-корреляции (взаимной корреляции) [12] и коэффициентов преобразования спектров сигналов (последние представляют собой отношение суммы амплитуд полос спектра, несущих информацию о состоянии технологической системы, включая состояние инструмента, т.е. значимых или информативных, к сумме амплитуд полос, в которых эта информация отражена неявно или слабо, либо совсем отсутствует, т.е. незначимых или шума [13]. Для определения значимых амплитуд использовался непараметрический метод, который в разведочном анализе данных носит название «ящик с усами» [14]).

Фрагменты сигналов пьезодатчиков показаны на рис. 2, a , b , а на рис. 2, $в$, $г$ представлены их гистограммы. Видно, что в сигналах присутствуют высоко- и низкочастотные составляющие колебаний. Сигнал от пьезодатчика по координате Y (рис. 1, $г$) имеет плотность распределения, близкую к гауссовой.

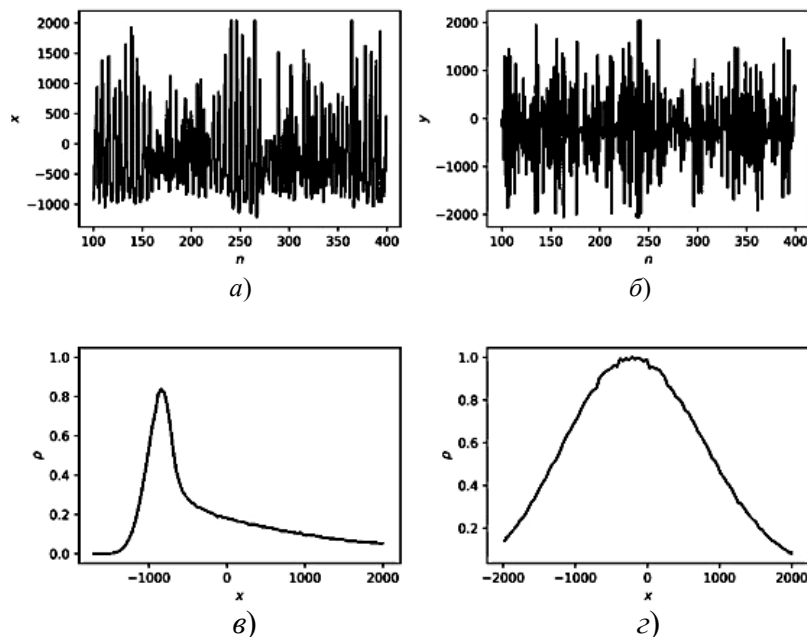


Рис. 2. Вид (a , b) и гистограммы ($в$, $г$) сигналов по координатам X (a , $в$) и Y (b , $г$)

Fig. 2. View (a , b) and histograms (c , d) of signals at the coordinates X (a , c) and Y (b , d)

Двумерные гистограммы, построенные по сигналам на 1 проходе (в исходном состоянии пластины), а также на 3, 6, 9, 12 и 15 проходах (т.е. после каждого цикла точения) показаны на

рис. 3. Оттенками серого показаны накопленные значения (выше – светлее). По горизонтали накапливались показания пьезодатчика по координате X , по вертикали – по координате Y .

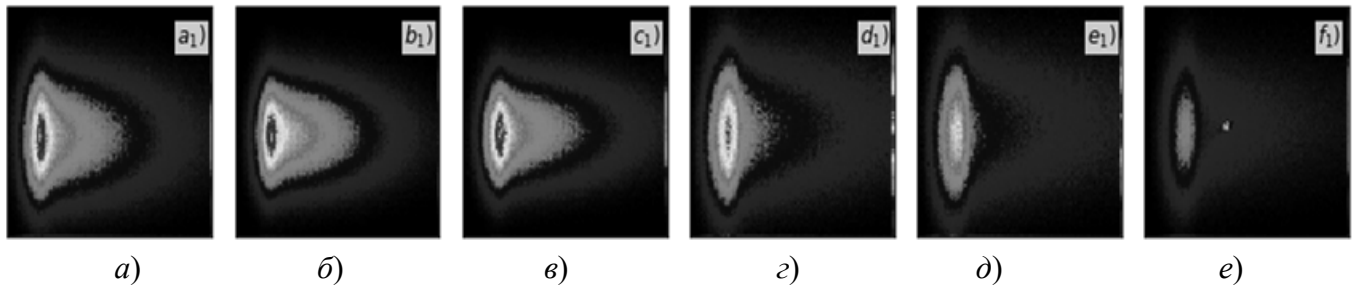


Рис. 3. Двумерные гистограммы сигналов пьезодатчиков на 1 (а), 3 (б), 6 (в), 9 (г), 12 (д) и 15 (е) проходах

Fig. 3. Two-dimensional histograms of piezo sensor signals at 1 (a), 3 (b), 6 (c), 9 (d), 12 (e) and 15 (f) trips

Анализ гистограмм показывает, что исходному состоянию пластины (диаграмма а) отвечает структура, имеющая вид «хвоста кометы», который постепенно уменьшается и на последней диаграмме практически отсутствует. Интерпретировать эти закономерности можно следующим образом: вид диаграмм на рис. 3, а также характер их изменения отражают скорость изменения состояния пластины на каждом проходе (рис. 1). Наличие хвоста кометы говорит о высокой скорости, а его отсутствие означает, что изменение идёт значительно медленнее. В данном случае это можно объяснить тем, что фиксированные частоты вращения заготовки, реализуемые приводом главного движения станка, не обеспечивали поддержания постоянства скорости резания, значение которой, постепенно повышаясь в ходе приработки пластины, приближалось к оптимальному. Основным следствием приработки и оптимизации стал выход пластины на стационарный режим работы.

Изложенное означает, что по виду двумерных гистограмм можно судить о результатах протекания процессов, изменяющих состояние инструмента. Однако они не позволяют идентифицировать механизм, который лежит в основе их получения. С целью идентификации механизма были вычислены коэффициенты кросс-корреляции (взаимной корреляции) $\langle x(t) y(t + \tau) \rangle$ и рассчитаны коэффициенты преобразования спектров сигналов.

Абсолютные значения коэффициентов кросс-корреляции в зависимости от временной задержки τ между сигналами показаны на рис. 4. Анализ коэффициентов показал, что в начале работы (на первом проходе пластины) максимальная корреляция между координатами имеет место со сдвигом $\tau = -4$, где единица времени соответствует периоду дискретизации сигналов. При этом симметричный ему пик для задержки $\tau = 4$ отсутствует. Это означает, что сигнал координаты Y опережает сигнал координаты X и связь односторонняя, т.е. Y выступает как источник воздействия на X . С ростом номера прохода характер связи между координатами усложняется – становятся заметно выше пики в области, которая ограничена задержками $\tau = -22$ и 14 , а сама область делается симметричной относительно исходного пика на $\tau = -4$. Симметрия пиков говорит о появлении и постепенном усилении взаимной связи между координатами. Изложенное означает, что изменение степени взаимосвязи является отображением механизма, изменяющего состояние режущего инструмента.

Для идентификации механизма была реализована следующая процедура. Вначале в пределах каждого прохода пластины выборками по 4096 точек были рассчитаны коэффициенты преобразования спектров сигналов. Затем в полученных массивах коэффициентов были выделены линейные тенденции и произведена оценка значимости их угловых

коэффициентов вычислением отношений коэффициентов к величинам средних квадратических ошибок их определения, представляющих собой t -критерии Стьюдента [15]. На заключительном этапе проводилось сравнение вычисленного значения t с табличным значением t_p для принятого уровня доверительной

вероятности P . Если выполнялось условие $t \geq t_p$, то с вероятностью P это означало, что проход сопровождался значимыми изменениями состояния пластины; в противном случае, т.е. когда $t < t_p$, значимые изменения отсутствовали.

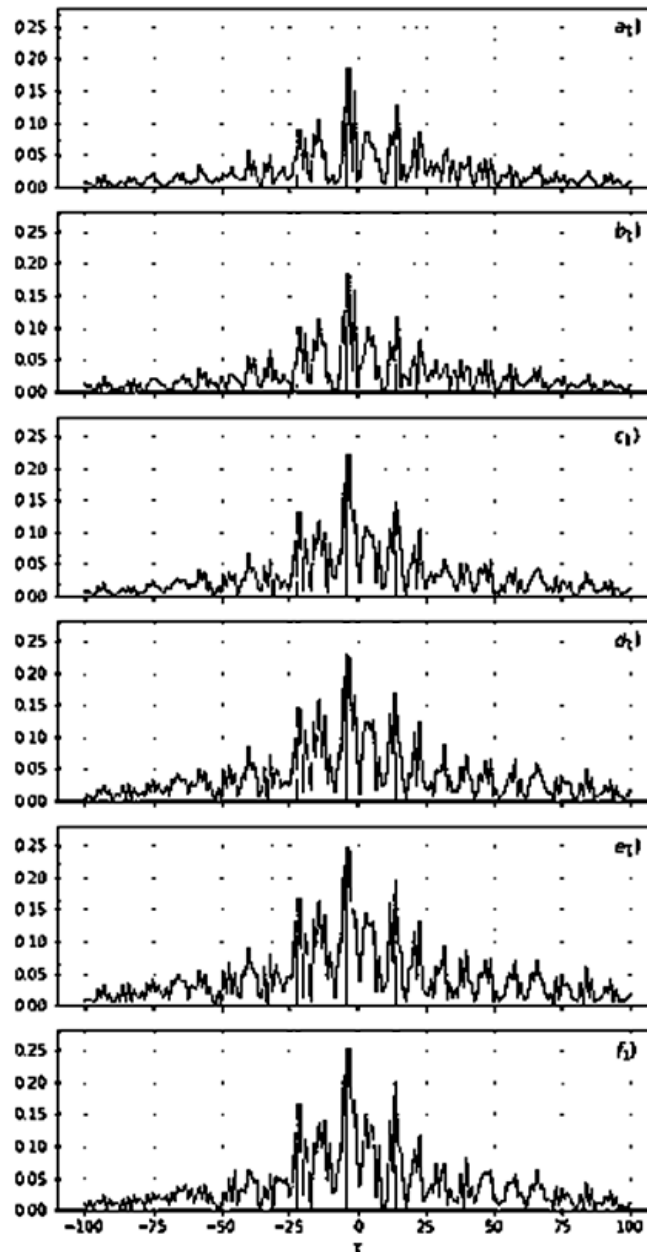


Рис. 4. Взаимная корреляция сигналов X и Y . Максимумы корреляции находятся на временах задержки

Fig. 4. Cross-correlation of signals X and Y . The correlation maxima are at the delay

Тенденции изменения t -критериев по каждой координате за всё время работы пластины показаны на рис. 5, а также табличное

значение t_p для вероятности $P = 0,95$; их сравнение показало следующее.

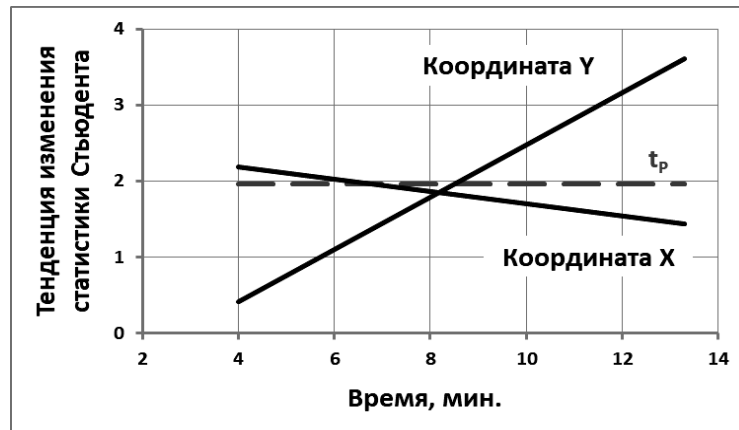


Рис. 5. Статистическое отображение механизма, изменяющего состояние пластины

Fig. 5. Statistical representation of the mechanism that changes the state of the plate

1. Значимые изменения состояния пластины имели место: в направлении координаты X в течение 6,5 мин после начала работы. Сопоставление с рис. 1 показало, что к этому моменту, в основном, завершилась приработка пластины; в направлении координаты Y через 8,5 мин после начала работы. Сопоставление с рис. 1 показало, что с этого момента значение скорости резания стало близко к оптимальному.

2. Смена направления значимых изменений состояния пластины с координаты X на координату Y в результате процессов приработки и оптимизации означает смену доминирования форм и, соответственно, ориентации траектории колебаний пластины на собственных частотах. Основным следствием становится изменение условий взаимодействия пластины с обрабатываемой поверхностью, и взаимодействие приобретает осциллирующий характер, что является благоприятным фактором, поскольку способствует снижению сил резания за счет перераспределения сил трения между передней и задней поверхностями пластины, оказывающего прямое влияние на процесс стружкообразования.

Изложенное означает, что механизм изменения состояния пластины в процессе её работы представляет собой изменение связей и связанностей в технологической системе и, как следствие, формирование у неё новых динамических свойств, обеспечивающих повышение устойчивости к возмущениям,

создаваемым рабочими процессами. Это выгодно отличает предложенный подход к исследованию от подходов, основанных на построении математической (аналитической или стохастической) модели реальной системы за счёт определённым образом формализованного представления её элементов и их взаимодействий, поскольку:

- построение модели ведётся в условиях ряда упрощающих предположений, которые определяют границы её применимости;

- в случае аналитической модели выполнить анализ реальной системы и выделить взаимодействующие элементы таким образом, чтобы получаемая модель обладала требуемой точностью и универсальностью, удаётся далеко не всегда;

- в случае стохастической модели обычно имеет место неизменность статистических характеристик.

Следствием становится снижение вероятности раскрытия с помощью модели установленного в данном исследовании механизма. В связи с этим предложенные процедуры и последовательность их применения могут рассматриваться как перспективная технология оценивания состояния металлорежущего инструмента, реализация которой в программном обеспечении систем ЧПУ позволит более эффективно решать традиционные задачи управления, в частности, технологическую [16, 17], в которой объектом управления становится реализуемый с помощью

технологической системы рабочий процесс (процесс резания), управляемой переменной (в данном случае) – состояние режущего инструмента, а управляющими параметрами – параметры технологического режима (прежде всего скорость резания).

Выводы

1. Разработана технология изучения процесса изменения состояния металлорежущего инструмента, основанная на регистрации сигналов о колебаниях технологической системы резания в направлениях по нормали и вдоль плоскости резания, их отображении в пространство временных, частотных характеристик и статистической проверке гипотез. Практическая реализация технологии позволила установить следующее:

– росту скорости износа соответствует наличие паттерна типа «хвост кометы» на двумерных гистограммах, в ячейках которых накапливаются содержащиеся в сигналах о колебаниях данные;

– стабилизации состояния инструмента соответствует усиление двухстороннего взаимодействия между направлениями колебаний, отображаемое коэффициентами взаимной корреляции (кросс-корреляции);

– механизм стабилизации представляет собой изменение связей и связанностей в динамической системе технологического оборудования (в данном случае за счёт приработки инструмента и оптимизации скорости резания), формирующее в ней новые свойства, которые обеспечивают повышение устойчивости к возмущениям, создаваемым рабочими процессами. Инструментом идентификации механизма является процедура оценки значимости изменения коэффициентов преобразования спектров сигналов о колебаниях в процессе работы инструмента.

2. Технология может быть реализована в программном обеспечении систем ЧПУ технологического оборудования, что позволит более эффективно решать традиционные задачи управления, в частности, технологическую, гарантированно обеспечивая повышение надёжности инструмента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Повышение** качества режущего инструмента / В.Г. Солоненко, Л.А. Солоненко, И.В. Дваденко и др. // СТИН. 2007. №7. С. 12–16.
2. **Зориктуев В.Ц., Никитин Ю.А., Сидоров А.С.** Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента // СТИН. 2007. №10. С. 31–34.
3. **Повышение** стойкости быстрорежущего инструмента ионно-лазерным поверхностным упрочнением / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов, В.В. Новиков и др. // Станки и инструмент. 2005. №6. С. 17–20.
4. **Верещака А.С., Третьяков И.П.** Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М: Машиностроение, 1986. 192 с.
5. **Безъязычный В.Ф., Басков М.В.** Расчетное определение степени влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых изделий // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. №7. С. 20–24.
6. **Комбинированные** плазменные способы химико-термической обработки для создания модифицированных покрытий на инструменте / В.А. Александров, Л.Г. Петрова, А.С. Сергеева и др. // СТИН. 2019. №33. С. 13–19.
7. **Кудинов В.А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
8. **Заковоротный В.Л., Флек М.Б.** Динамика процесса резания. Синергетический подход. Ростов н/Д: Терра, 2006. 876 с.
9. **Жарков И.Г.** Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 184 с.
10. **Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В.** Управление динамическим качеством металлорежущих станков на основе искусственного интеллекта. Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т», 2004. 240 с.
11. **Миркин Б.Г.** Базовые методы анализа данных: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2025. 297 с.
12. **Тюрин Ю.Н., Макаров А.А.** Анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 2002. 528 с.
13. **Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Янкин И.Н., Бровкова М.Б.** Динамический мониторинг технологического оборудования. Саратов: СГТУ, 2008. 312 с.
14. **Большаков А.А., Каримов Р.Н.** Методы обработки многомерных данных и временных рядов: Учебное пособие для вузов. М: Горячая линия-Телеком, 2007. 522 с.
15. **Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М.** Анализ временных рядов и прогнозирование. М.: Финансы и статистика, 2001. 228 с.
16. **Адаптивное** управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. М.: Машиностроение, 1980. 536 с.
17. **Сосонкин В.Л.** Задачи числового программного управления и их архитектурная реализация // Станки и инструмент. 1988. № 10. С. 39–40.

REFERENCES

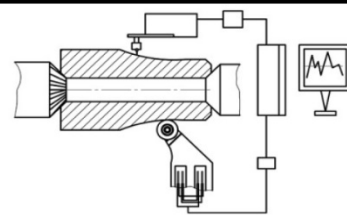
1. Improving the quality of the cutting tool / V.G. Solonenko, L.A. Solonenko, I.V. Dvadnenko et al. // STIN. 2007. No. 7, pp. 12–16.
2. Zoriktuev V.Ts., Nikitin Yu.A., Sidorov A.S. Monitoring and prediction of cutting-tool wear// STIN. 2007. No.10, pp. 31–34.
3. Improving the durability of a high-speed tool by ion-laser surface hardening / V.N. Latyshev, A.G. Naumov, V.V. Novikov et al. // Machines and tools. 2005. No. 6, pp. 17–20.
4. Vereshchaka A.S., Tretyakov I.P. Cutting tools with wear-resistant coatings. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 192 p.
5. Bezy'azychniy V.F., Baskov M.V. Estimated ranging of cutting tool coating efficiency on the quality parameters of the workpiece surface layer // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2017. No. 7, pp. 20–24.
6. Combined plasma methods of chemical and thermal treatment for making modified coatings on tools / V.A. Alexandrov, L.G. Petrova, A.S. Sergeeva et al. // STIN. 2019. No. 33. pp. 13–19.
7. Kudinov V.A. Dynamics of machine tools. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p.
8. Zakorotny V.L., Flek M.B. Dynamics of cutting process. Synergetic approach. Rostov-on-Don: Terra, 2006, 876 p.
9. Zharkov I.G. Vibrations during mechanical edge tooling. Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 184 p.
10. Kabaldin Yu.G., Bilenko S.V., Seriy S.V. Dynamic quality control of metal-cutting machines based on artificial intelligence. Komsomolsk-na-Amurye: Komsomolsk-na-Amurye State Technical University, 2004, 240 p.
11. Mirkin B.G. Core Data Analysis: textbook for universities. Moscow: Yurayt, 2025, 297 p.
12. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. Data analysis on a computer. Moscow: INFRA-M, 2002, 528 p.
13. Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Yankin I.N., Brovkova M.B. Dynamic monitoring of technological equipment. Saratov: SSTU, 2008, 312 p.
14. Bolshakov A.A., Karimov R.N. Methods of multi-dimensional data and time series processing: A textbook for universities. Moscow: Gorychaya liniya-Telecom, 2007, 522 p.
15. Afanasyev V.N., Yuzbashev M.M. Time series analysis and forecasting. Moscow: Finance and Statistics, 2001, 228 p.
16. Adaptive control of technological processes / Y.M. Solomentsev, V.G. Mitrofanov, S.P. Protopopov, et al. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 536 p.
17. Sosonkin V.L. Numerical control tasks and their architectural implementation // Machines and tools. 1988. No. 10, pp. 39–40.

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 22.01.2025; одобрена после рецензирования 31.01.2025; принята к публикации 14.02.2025.

The article was submitted 22.01.2025; approved after reviewing 31.01.2025; assepted for publication 14.02.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 32-39.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 32-39.

Научная статья
УДК 621.9:67.02+658.562
doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-32-39

Научноёмкие технологии, обеспечивающие повышение производительности и надежности изделий машиностроения

Виктор Иванович Бутенко¹, д.т.н.
Валерий Александрович Лебедев², к.т.н.
Роман Геннадьевич Кадач³, аспирант

^{1, 2, 3} *Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия*

¹ butenkowiktor@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9260-1030>

² va.lebedev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1838-245X>

³ rkad925@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-000-0000>

Аннотация. Представлена методика экономической оценки внедрения на предприятиях машиностроения научноёмких технологий обработки деталей различного назначения из труднообрабатываемых сталей и сплавов. Показано, что общий экономический эффект от использования в производственных процессах научноёмких технологий складывается из прямого и дополнительного эффектов. Прямой экономический эффект может быть получен за счёт оптимизации режимов и изменения условий обработки деталей, повышения стойкости используемого металлорежущего инструмента и совершенствования технологической системы в целом путём повышения её надёжности и виброустойчивости. Для достижения прямого экономического эффекта предложено использовать в технологических процессах обработки деталей и заточки металлорежущего инструмента йодосодержащие средства, а также подачу в зону контакта инструмента и обрабатываемой поверхности детали охлажденно-ионизированного воздуха. Дополнительный экономический эффект может быть получен как за счёт повышения качества обработанной поверхности детали, так и совершенствования организационно-технологических мероприятий при проведении ремонтных работ, техническом обслуживании и выполнении регламентных работ в процессе эксплуатации изделий машиностроения. Рассмотрены основные составляющие дополнительного экономического эффекта и приведена методика их определения. На основе анализа разработанной методики экономической оценки эффективности научноёмких технологий обработки деталей и её апробации на ряде предприятий машиностроения авторы утверждают, что использование её даёт расчётные данные, сопоставимые с действительно получаемым эффектом, и может быть применена в любом типе производства, в том числе при ремонте машин.

Ключевые слова: изделие машиностроения, деталь, технология, экономический эффект, инструмент, поверхностный слой, работоспособность

Для цитирования: Бутенко В.И., Лебедев В.А., Кадач Р.Г. Научноёмкие технологии, обеспечивающие повышение производительности и надежности изделий машиностроения // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 32–39. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-32-39

High-tech technologies for the improvement of the productivity and reliability of mechanical engineering products

Viktor I. Butenko¹, D. Eng.

Valery A. Lebedev², Ph.D. Eng.

Roman G. Kadach³, PhD student

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

¹ butenkowiktor@yandex.ru

² va.lebedev@yandex.ru

³ rkad925@mail.ru

Abstract. Economics evaluation method of high-tech technologies application for part process of various purpose made of hard-to-machone steel or alloys at machine-building enterprises is presented. It is shown that the overall economic effect of using high-tech technologies in production processes consists of direct and additional effects. Direct benefits can be obtained by optimizing the modes and changing the conditions of machining parts, increasing the durability of the used metal-cutting tool and improving the manufacturing system as a whole by increasing its reliability and vibration resistance. To achieve direct benefits, it is proposed to use iodine-containing agents in the machining parts processing procedure and metal-cutting tool sharpening, as well as the supply of cooled ionized air both to the contact zone of the tool and the surface of the part. Additive effect can be obtained both by improving the quality of the machined surface of the part, and by perfecting organizational and technological measures during repair work, maintenance and routine maintenance within the operation of mechanical engineering products. The main components of the additive economic effect are viewed and the technique for their determination is given. Based on the analysis of the developed technique for the economics evaluation for high-tech technologies in part process together with its testing at a number of machine-building enterprises, the authors prove that its use provides calculated data comparable to the actual benefits, and can be applied in any type of production, including machine maintenance.

Keywords: mechanical engineering product, part, technology, benefits, tool, surface layer, operability

For citation: Butenko V.I., Lebedev V.A., Kadach R.G. High-tech technologies for the improvement of the productivity and reliability of mechanical engineering products / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 32–39. doi: 10.30987/2223-4608-2024-4-32-39

Введение

Научно-технический прогресс в современном машиностроительном производстве, вызванный широким внедрением наукоёмких технологий, предусматривает не только повышение надёжности и работоспособности создаваемых изделий, но и предъявляет высокие требования к затратам на их изготовление и эксплуатацию [1 – 3]. В связи с этим на предприятиях машиностроения актуальной является проблема изготовления и эксплуатации деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов, вызванная особенностями их структуры и фазовых превращений при повышенных температурах [4, 5].

В настоящее время разработаны инновационные наукоёмкие технологии обработки деталей из хромоникелевых и высокомарганцовистых сталей и сплавов, позволяющие существенно повысить стойкость используемых металлорежущих инструментов и улучшить качество обработанных поверхностей деталей [4]. Однако, как показывают исследования, в

практике работы предприятий машиностроения при использовании разработанных технологий возникают трудности в оценке не только прямого (действительного) экономического эффекта от их внедрения, но и в определении дополнительного (ожидаемого) эффекта от повышения работоспособности деталей машин [6 – 8].

Методика экономической оценки эффективности наукоёмких технологий

В основу экономической оценки эффективности внедрения в машиностроительное производство наукоёмких технологий изготовления и эксплуатации деталей положен расчётно-экспериментальный метод с проведением подконтрольной эксплуатации изделий машиностроения [9, 10]. В общем случае экономическая оценка эффективности наукоёмких технологий обработки деталей на предприятиях машиностроения может быть осуществлена путём расчёта суммарного эффекта Э, складывающегося из прямого

(действительного) эффекта \mathcal{E}_1 , вызванного внедрением в производство рекомендуемых мероприятий, и дополнительного (ожидаемого) эффекта \mathcal{E}_2 , обусловленного повышением работоспособности обработанных деталей и, как следствие, увеличение срока службы изделий машиностроения:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2. \quad (1)$$

Данные для расчёта прямого эффекта \mathcal{E}_1 могут быть получены в результате проведения экспериментальных исследований предлагаемых нововведений в технологический процесс обработки детали, а для расчёта дополнительного эффекта \mathcal{E}_2 рекомендуется организация и проведение подконтрольной эксплуатации изделий машиностроения с использованием соответствующих статистических или справочных данных.

Экономическая оценка прямого (действительного) годового эффекта

Методика определения прямого годового экономического эффекта \mathcal{E}_1 основывается на сопоставлении приведённых затрат по существующим технологиям или процессам \mathcal{Z}_6 и разработанным наукоёмким \mathcal{Z}_3 , приуроченным к расчётному году:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{Z}_6 - \mathcal{Z}_3. \quad (2)$$

В общем виде величина приведённых затрат \mathcal{Z}_i находится в соответствии с существующими методиками определения экономической эффективности использования в машиностроении новой техники и технологий [1, 6, 10]:

$$\mathcal{Z}_i = C_i + E_n \cdot K_i, \quad (3)$$

где C_i – себестоимость изделия (детали или машины), включая стоимость материалов, амортизацию и затраты как живого, так и овеществлённого труда; K_i – стоимость капитальных затрат на единицу изготавливаемого изделия (детали или машины); E_n – нормативный коэффициент окупаемости дополнительных капитальных вложений.

Конкретизируя выражение (3) для определения приведённых затрат \mathcal{Z}_i в случае механической обработки детали с учётом затрат на эксплуатацию инструмента, можно записать:

$$\mathcal{Z}_i = a_m + a_b + \frac{I + C_n + n_n}{T(n_n + 1)} + \frac{E_n \cdot K_i}{\Phi}, \quad (4)$$

где a_m, a_b – минутные затраты на работу оборудования (машинное время) и вспомогательное время на операцию, связанное с подготовительными работами и обслуживанием оборудования и оснастки; C_n – стоимость одной переточки инструмента; n_n – допустимое количество переточек инструмента; Φ – годовой фонд времени работы оборудования; I – начальная стоимость инструмента; T – срок окупаемости.

Практикой работы машиностроительных предприятий установлено, что величина приведённых затрат \mathcal{Z}_i , зависящая от элементов режимов резания, может изменяться от значений, допускаемых мощностью станка $N_{\text{доп}}$

$$\mathcal{Z}_N = \frac{\mathcal{Z}_p^N \cdot m_T}{1 - m_T} \left(\frac{v_N}{v_T} \right)^{\frac{1}{m_T}} + \frac{E_n \cdot K_i}{\Phi}, \quad (5)$$

до значений, соответствующих минимально допустимой нормированной стойкости используемого инструмента $T_{\text{доп}}$

$$\mathcal{Z}_T = \frac{\mathcal{Z}_p^T \cdot x_v}{1 - x_v} \left(\frac{T_N}{T} \right)^{\frac{1}{x}} + \frac{E_n \cdot K_i}{\Phi}, \quad (6)$$

где \mathcal{Z}_p – переменные минутные затраты работы оборудования; v_T – скорость резания, допускаемая нормированной стойкостью инструмента $T_{\text{доп}}$; T_N – стойкость инструмента, соответствующая допустимой мощностью станка $N_{\text{доп}}$; m_T, x_v – показатели степеней в формуле зависимости стойкости инструмента от элементов режима резания [11].

Тогда прямой (действительный) экономический эффект \mathcal{E}_1 , получаемый от внедрения в производство наукоёмкой технологии, направленной на оптимизацию показателей качества поверхностного слоя детали и повышение производительности обработки, или способа заточки металлорежущего инструмента, повышающего его стойкость, определится по формуле

$$\Delta_1 = \left(\sum_{j=1}^m 3_j (t_{шт})_j - \sum_{i=1}^n 3_i (t_{шт})_i \right) \cdot k_n, \quad (7)$$

где $3_j, 3_i$ – общие минутные приведённые затраты соответственно для j -го и i -го сравниваемых вариантов технологий; $(t_{шт})_j, (t_{шт})_i$ – штучное время обработки детали соответственно для j -го и i -го сравниваемых вариантов технологий; m, n – количество операций по каждому сравниваемому варианту технологии или процесса; k_n – коэффициент приращения, учитывающий народнохозяйственную неравномерность доходов, получаемых от использования результатов внедрения новой техники в разное время [1, 7].

В работе [12] дана технико-экономическая оценка эффективности использования йодосодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств при выполнении сверлильных операций, показавшая возможность увеличения производительности обработки и улучшения качества поверхностей деталей резанием. Применение в процессе заточки металлоорежущего инструмента охлаждённо-ионизированного воздуха или йодосодержащих средств [13] также обеспечивает прямой экономический эффект за счёт существенного повышения стойкости инструмента.

Экономическая оценка дополнительного (ожидаемого) эффекта

Помимо увеличения стойкости металлоорежущего инструмента и оптимизации режима обработки, целью внедрения наукоёмких технологий является повышение ресурса и надёжности изделий машиностроения за счёт улучшения показателей качества поверхностного слоя деталей. В результате снижаются эксплуатационные затраты, связанные с техническим обслуживанием и ремонтами машины, вызванные, например, износом её деталей.

Структурная схема расчёта экономической эффективности от повышения износостойкости поверхностей деталей при технологическом обеспечении показателей качества поверхностного слоя приведена на рис. 1, согласно которой ожидаемый дополнительный (ожидаемый) годовой экономический эффект Δ_2 определяется сокращением затрат на

обслуживание и ремонт машины Δ'_2 и осуществлением ею функциональных действий Δ''_2 за увеличенный срок службы $T''_{сл}$:

$$\Delta_2 = \Delta'_2 + \Delta''_2. \quad (8)$$

Согласно структурной схеме на рис. 1 годовые текущие затраты Δ'_2 , входящие в состав затрат на обслуживание и ремонт машины, делятся на две группы: затраты, зависящие от повышения срока службы изделия $T''_{сл}$ в результате внедрения наукоёмких технологий или процессов $C_{эф}$, и затраты, не зависящие от $T_{сл}$ (капитальные затраты) $K_{эф}$.

Годовые текущие затраты $C_{эф}$, связанные с внедрением эффективных наукоёмких технологий и направленные на увеличение срока службы машины $T''_{сл}$, могут быть представлены следующим образом [15]:

$$C_{эф} = \frac{(C_a + C_{тр} + C_{то} + C_{ни})}{N}, \quad (9)$$

где C_a – амортизационные отчисления на реновацию и капитальный ремонт машины; $C_{тр}$ и $C_{то}$ – плановые затраты на текущий ремонт и техническое обслуживание машины, включая проведение регламентных работ; $C_{ни}$ – суммарные годовые затраты на неучтённые работы, связанные, например, с испытанием машины; N – число изделий (деталей или машин), при изготовлении которых были использованы наукоёмкие технологии.

Срок службы машины после его повышения $T''_{сл}$ определится по формуле

$$T''_{сл} = \frac{T_{сл} \cdot T''_{г}}{n_u \cdot T'_{г}}, \quad (10)$$

где $T_{сл}$ – срок службы (ресурс) машины до внедрения наукоёмкой технологии обработки деталей; $T'_{г}, T''_{г}$ – годовой фонд времени работы машины до и после повышения его срока службы:

$$T''_{г} = T'_{г} + \Delta T''_n, \quad (11)$$

где $\Delta T''_n$ – дополнительный фонд времени эксплуатации машины повышенной надёжности и ресурса:

$$\Delta T_n'' = T_n'' - T_n', \quad (12)$$

где T_n' , T_n'' – время простоя машины в ремонтах, техническом обслуживании и при выполнении регламентных работ в течение года соответственно до и после повышения её ресурса:

$$T_n = \frac{T_{з(в)} \cdot T_{\Gamma}'}{T_{\text{пер}}}, \quad (13)$$

где $T_{з(в)}$ – среднее время замены или восстановления деталей в транспортном средстве; $T_{\text{пер}}$ – периодичность замены деталей или восстановления деталей в транспортном средстве.

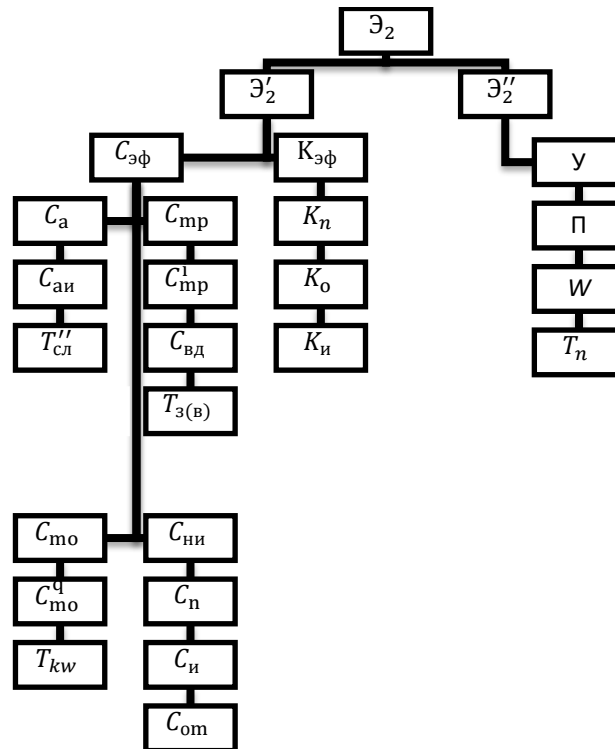


Рис. 1. Структурная схема дополнительного эффекта \mathcal{E}_2 , обусловленного повышением износостойкости поверхностей деталей машин

Fig. 1. Block diagram of the addition \mathcal{E}_2 effect due to increased wear resistance of machine parts surfaces

Годовые затраты на текущий ремонт (плановый и неплановый) изделия машиностроения $C_{\text{тр}}$ складываются из затрат на замену или восстановление i -х деталей в год:

$$C_{\text{тр}} = \frac{\sum_{i=1} C_{\text{т.р}}^i \cdot T_{\Gamma}'}{T_{\text{пер}}}, \quad (14)$$

где $C_{\text{т.р}}^i$ – затраты на каждый вид работы, связанной с текущим или капитальным ремонтом машины; i – число деталей, отказавших в эксплуатируемой машине за год.

Годовые затраты на техническое обслуживание изделия машиностроительного производства, включая проведение регламентных

работ, складываются из затрат на проведение q – 1, 2, 3... видов обслуживаний в год и определяется по формуле

$$C_T = \frac{\sum_{q=1}^l (C_{\text{то}}^q + 3_{\text{см}} + 3_{\text{вм}}) \cdot T_{\Gamma}'}{T_{\text{пер}}^{(m)q}}, \quad (15)$$

где $C_{\text{то}}^q$ – затраты на выполнение q -го технического обслуживания в год; $T_{\text{пер}}^{(m)q}$ – периодичность выполнения q -го технического обслуживания в год; $3_{\text{см}}$ – затраты на смазочные материалы; $3_{\text{вм}}$ – затраты на вспомогательные материалы (прокладки, уплотнения и т.д.); l – число видов обслуживания технического обслуживания транспортного средства в год.

Затраты по видам работ (осмотр, мойка, диагностирование, регулирование, смазка и т.д.), проводимых при техническом обслуживании, включая регламентные работы, определяются по формуле

$$C_{\text{то}}^q = \sum_{k=1}^p \sum_{w=1}^r C_{kw} \cdot T_{kw} + C_{\text{от}}, \quad (16)$$

где C_{kw} – тарифная ставка w -го рабочего при выполнении им k -го вида операции; T_{kw} – штучное время выполнения k -й операции технического обслуживания w -м рабочим; $C_{\text{от}}$ – затраты на использование необходимого оборудования, приспособлений, инструмента; p – число рабочих, выполняющих операции технического обслуживания; r – число операций в каждом виде технического обслуживания машины.

Суммарные годовые затраты на неучтённые работы, связанные с потребностями производственной системы в материальных ресурсах и испытанием изделия машиностроения $C_{\text{ни}}$, включающие затраты на изготовление приборов и устройств контроля показателей качества поверхностного слоя деталей $C_{\text{п}}$, инструментов $C_{\text{и}}$, испытательных стендов $C_{\text{от}}$ и т.д., могут быть получены в результате подконтрольной эксплуатации машины и рассчитаны по формуле [15]

$$C_{\text{ни}} = C_{\text{п}} + C_{\text{и}} + C_{\text{от}} + \dots \quad (17)$$

Годовые капитальные вложения $K_{\text{эф}}$, не зависящие от $T'_{\text{сл}}$ вычисляются по формуле

$$K_{\text{эф}} = K_{\text{п}} + K_{\text{о}} + K_{\text{и}}, \quad (18)$$

где $K_{\text{п}}$, $K_{\text{о}}$, $K_{\text{и}}$ – соответственно капитальные затраты на разработку и проектирование наукоемких технологий обработки деталей, изготовление дополнительной оснастки, испытание изделия машиностроения повышенной надёжности и долговечности.

Вторая составляющая дополнительного экономического эффекта \mathcal{E}''_2 находится из выражения

$$\mathcal{E}''_2 = Y' + Y'', \quad (19)$$

где Y' и Y'' – ущербы от простоя машины в ремонте, техническом обслуживании или при выполнении регламентных работ до и после внедрения наукоемких технологий, зависящие от структуры производственной системы и проводимых при внедрении инновационных технологий организационно-технических мероприятий [14].

Согласно структурной схеме дополнительного эффекта \mathcal{E}_2 (рис. 1) ущербы Y' и Y'' определяются прибылью Π от функционирования машины, числом рабочих W , не задействованных в получении этой прибыли, и временем простоя $T_{\text{п}}$, которые могут быть установлены при проведении подконтрольной эксплуатации машины.

Учитывая приведённые зависимости (7), (8), (18) определения составляющих дополнительного (ожидаемого) эффекта в год \mathcal{E}_2 , обусловленного увеличением ресурса N изделий машиностроения за счёт повышения у них качества обработанных поверхностей деталей и организационно-технологических мероприятий при проведении ремонтных работ, техническом обслуживании и выполнении регламентных работ в процессе эксплуатации, может быть рассчитана по формуле

$$\mathcal{E}_2 = \left(\frac{C_i(T''_{\text{сл}} - T'_{\text{сл}})}{T'_{\text{сл}}} + \mathcal{E}''_2 - E_{\text{н}} \frac{K_{\text{эф}}}{N} \right) N. \quad (20)$$

Представленная методика оценки экономической эффективности внедрения наукоемких технологий обработки деталей в машиностроительное производство, включая оптимизацию режимов обработки и применение новых способов заточки металлорежущего инструмента, прошла апробацию на ряде машиностроительных предприятиях Южного федерального округа. Полученные расчётные значения прямого \mathcal{E}_1 и дополнительного \mathcal{E}_2 экономических эффектов оказались сопоставимыми с реально полученными эффектами.

Выводы

1. Экономическая оценка эффективности наукоемких технологий обработки деталей машин должна проводиться по двум показателям: прямому \mathcal{E}_1 и дополнительному \mathcal{E}_2 экономическим эффектам. Расчёт прямого

экономического эффекта Δ_1 основывается на сопоставлении приведённых затрат по существующим технологиям или процессам и разработанным наукоёмким, приуроченным к расчётному году. Он может быть получен за счёт оптимизации режимов и изменения условий обработки деталей, повышения стойкости используемого металлорежущего инструмента и совершенствования технологической системы в целом путём повышения её надёжности и виброустойчивости. Дополнительный экономический эффект Δ_2 достигается как за счёт повышения качества обработанной поверхности детали, так и совершенствования организационно-технологических мероприятий при проведении ремонтных работ, техническом обслуживании и выполнении регламентных работ в процессе эксплуатации изделия машиностроения.

2. Предложенная методика расчёта дополнительного экономического эффекта Δ_2 обладает универсальностью, т.к. может быть применена как для оценки наукоёмких технологий, внедряемых в процесс обработки детали, так и изделия машиностроения в целом.

3. Данные, полученные в результате предварительного расчёта составляющих прямого Δ_1 и дополнительного Δ_2 экономических эффектов от внедрения в производство наукоёмких технологий обработки деталей, могут быть использованы как для прогнозирования целесообразности внесения их в технологический процесс, так и для определения эксплуатационно-технологических путей повышения ресурса (срока службы) изделий машиностроения в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Чернова О.В.** Экономическая эффективность новой техники, технологии и организации производства: методические указания. Ковров: КГТА, 2011. 32 с.

2. **Сустина Т.А., Сафина Д.М.** Методика оценки экономической эффективности инвестиций во внедрение мероприятий бережливого производства // Российское предпринимательство. 2018. Т. 19. № 10. С. 3085–3094. doi.org/10.18334/rp.19.10.39490.

3. **Батьковский А.М., Кравчук П.В., Стяжкин А.Н.** Оценка экономической эффективности производства высокотехнологичной продукции инновационно-активными предприятиями отрасли //

Креативная экономика. 2019. Т. 13. №1. С. 115–128. doi.org/10.18334/ce.13.139738.

4. **Бутенко В.И., Дуров Д.С., Шаповалов Р.Г.** Наукоёмкие технологии создания высокоресурсных деталей машин. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. 404 с.

5. **Бутенко В.И.** Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2017. 481 с.

6. **Яковлева Е.А.** Анализ экономической эффективности нововведений на основе стоимостного подхода // Креативная экономика. 2015. Т. 9. №11. С. 1385–1396. doi.org/10.18334/ce.9.11.2169.

7. **Румянцева Е.Е.** Новая экономическая энциклопедия. М.: ИНФРА-М, 2008. 826 с.

8. **Уколов А.И.** Оценка рисков: учебник. М.: Директив-Медиа, 2018. 627 с.

9. **Коган А.Б., Болдырев Н.П.** Теоретические аспекты эффективности экономических систем // Вестник Оренбургского государственного университета. 2016. № 58. С. 45–55.

10. **Экономическая эффективность технических решений: учеб. пособие / С.Г. Баранчикова [и др.]; под общ. ред. Проф. И.В. Ершовой.** Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2016. 140 с.

11. **Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова.** М.: Машиностроение-1, 2001.

12. **Бутенко В.И., Куприк А.В.** Технико-экономическая оценка эффективности использования йодосодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств при выполнении сверлильных операций // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: Сборник трудов международного научного симпозиума технологов-машиностроителей. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. С. 20–26.

13. **Бутенко В.И.** Применение йода и его соединений в процессах обработки и эксплуатации деталей машин. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2023. 242 с.

14. **Скляренко В.К., Прудников В.М.** Экономика предприятия: учебник. М.: ИНФРА-М, 2009. 528 с.

15. **Терешина В.В.** Анализ потребности производственной системы в материальных ресурсах для оценки эффективности деятельности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ecsocman.hse.ru>.

REFERENCES

1. Chernova O.V. Economic efficiency of new equipment, technology and production organization: methodological guidelines. Kovrov: KGTA, 2011, 32 p.

2. Sustina T.A., Safina D.M. Methodology for assessing the economic efficiency of investments in the implementation of lean manufacturing measures// Russian

Entrepreneurship, 2018, vol. 19, no. 10, pp. 3085–3094. doi.org/10.18334/tp.19.10.39490

3. Batkovsky A.M., Kravchuk P.V., Styazhkin A.N. Evaluation of the economic efficiency of the production of high-tech products by innovative and active enterprises of the industry // Creative economy, 2019, vol. 13, no. 1. pp. 115–128. doi.org/10.18334/ce .13.139738.

4. Butenko V.I., Durov D.S., Shapovalov R.G. High-tech technology to create high-efficiency machine parts. Taganrog: SFU Publishing House, 2014, 404 p.

5. Butenko V.I. Scientific foundations of functional engineering of the machine parts of the surface layer. Rostov-on-Don: Publishing house of the DSTU Center, 2017, 481 p.

6. Yakovleva E.A. Analysis of the economic efficiency of innovations based on the cost approach // Creative economy. 2015, vol. 9, no. 11, pp. 1385–1396. – doi.org/10.18334/ce .9.11.2169.

7. Rumyantseva E.E. New Economic Encyclopedia. Moscow: INFRA–M, 2008, 826 p.

8. Ukolov A. I. Risk assessment: textbook. Moscow: Direct-Media, 2018. 627 p.

9. Kogan A.B., Boldyrev N.P. Theoretical aspect of economic systems effectiveness// Bulletin of Orenburg State University, 2016, No. 58, pp. 45–55.

10. Cost effectiveness of engineering solution: study guide / S.G. Baranchikova [et al]; under general editorship of Prof. I.V. Ershova. Yekaterinburg: Ural Un-ty, 2016, 140 pp.

11. Handbook of a machine-building technologist: in 2 volumes / edited by A.M. Dalsky, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov, A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie-1, 2001.

12. Butenko V.I., Kuprik A.V. Technical and economic assessment of the effectiveness of using iodine-containing lubricating and cooling technological means when performing drilling operations // Fundamental principles of physics, chemistry and mechanics of high-tech technological systems for forming and assembling products: Proceedings of the international scientific symposium of engineering technologists. Rostov-on-Don: DSTU, 2022. pp. 20–26.

13. Butenko V.I. The use of iodine and its compounds in the pro-cessing and operation of machine parts. Rostov-on-Don: Publishing center of DSTU, 2023, 242 p.

14. Sklyarenko V.K., Prudnikov V.M. Enterprise economics: textbook. Moscow: INFRA-M, 2009, 528 p.

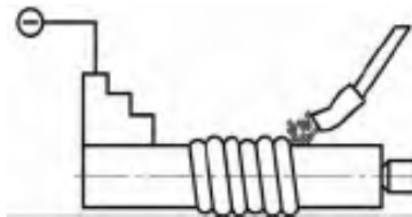
15. Tereshina V.V. Analysis of the production system demand for material resources for estimation of operational efficiency [Electronic resource]. – Access mode: <https://ecsocman.hse.ru>.

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 23.01.2025; одобрена после рецензирования 16.02.2025; принята к публикации 19.02.2025.

The article was submitted 23.01.2025; approved after reviewing 16.02.2025; assepted for publication 19.02.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 40-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 40-48.

Научная статья
УДК 621.891
doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-40-48

Электрохимическое шлифование гальванизированных электрических соединителей для увеличения коэффициента трения покоя в соединении

Анатолий Григорьевич Суслов¹, д.т.н.

Денис Александрович Дербуш², инженер-испытатель

Михаил Геннадьевич Шалыгин³, д.т.н.

^{1,3} Брянский государственный технический университет, Брянск

² НИЦ (ИМО и ИО) войсковой части 15644, Знаменск

¹ naukatm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>

² denderbush@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0831-5557>

³ migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

Аннотация. Рассмотрено гальваническое покрытие электрических соединителей. Установлено, что существующие технологии нанесения гальванических покрытий обеспечивают то качество поверхности, которое было получено на подложке. На примере гальванического никелирования на медную подложку предложен способ повышения качества поверхностного никелированного слоя. В качестве дополнительной технологической операции предложено использовать электрохимическое шлифование. Чередование электрохимического шлифования и гальванического никелирования позволит получить более качественный поверхностный слой никеля, что позволит обеспечить большую площадь фактического контакта в соединении. Это, в свою очередь, позволит повысить коэффициент трения покоя и надежность электрического соединения при вибрациях. Представленная поверхность обеспечит минимальное число трещин, глубоких царапин и вмятин на изделии, что в свою очередь увеличивает электрическую проводимость, поверхностное соединение контактных электрических соединителей, а также снижает возникающее при соединении контактов электрическое сопротивление.

Ключевые слова: никелирование, электрохимическое шлифование, коэффициент трения покоя, качество поверхности, площадь фактического контакта

Для цитирования: Суслов А.Г., Дербуш Д.А., Шалыгин М.Г. Электрохимическое шлифование гальванизированных электрических соединителей для увеличения коэффициента трения покоя в соединении // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 40-48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-40-48

Electrochemical grinding of galvanized electrical connectors for the raise of static coefficient of friction in the connection

Anatoly G. Suslov¹, D.Eng.

Denis A. Derbush², Test engineer

Mikhail G. Shalygin³, D.Eng.

^{1,3} Bryansk State Technical University, Bryansk

² RDE (IMMO and IO) of military unit 15644, Znamensk

¹ naukatm@yandex.ru

² denderbush@yandex.ru

³ migshalygin@yandex.ru

Abstract. Galvanic coating of electrical connectors is viewed. It was established that the existing electroplating technologies ensure the surface quality that was obtained on the support material. Using the example of galvanic nickel plating on a copper support plate, a method for improving the quality of the nickel-plated surface layer is proposed. It is proposed to use electrochemical grinding as an additional technological operation. Alternating electrochemical grinding and galvanic nickel plating will make it possible to obtain a higher-quality nickel surface layer, which will allow for a larger area of actual contact in the connection. This, in turn, will increase the static coefficient of friction and the reliability of the electrical connection during vibrations. The presented surface will provide a minimum number of cracks, deep scratches and dents on the product, which in turn increases electrical conductivity, surface compound of the contact electrical connectors, and also reduces the electrical resistance that occurs when interconnection.

Keywords: nickel plating, electrochemical grinding, static coefficient of friction, surface quality, actual contact area

For citation: Suslov A.G., Derbush D.A., Shalygin M.G. Electrochemical grinding of galvanized electrical connectors for the raise of static coefficient of friction in the connection / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-40-48

Введение

Подвижные соединения представляют собой одни из самых ненадежных элементов техники, что приводит к значительным материальным и энергетическим потерям, масштабы которых могут достигать десятков миллиардов рублей. Один из наиболее распространенных типов подвижных соединений в технической сфере – это электрические контакты. Они должны обеспечивать высокую эксплуатационную надежность работы энергетических систем и автоматических устройств. Надежность работы сопряжения электрических соединителей определяется через качество поверхностного слоя, которую влияет на коэффициент трения покоя и на долговечность работы сопряжения. Обеспечению должного качества поверхностного слоя соединений посвящено значительное число работ [1, 2]. Большая часть электроэнергии, вырабатываемой в мире, проходит через скользящие электрические контакты, поэтому даже небольшое снижение электрических и механических потерь в этих контактах может привести к значительной экономии энергии.

Одним из этапов в производстве электрических контактов является гальваническая обработка [3]. Наносимая металлическая пленка предотвращает коррозию и окисление поверхностей, придавая им привлекательный внешний вид, а также улучшая износостойкость, твердость и электропроводность. Существует множество видов гальванических покрытий, которые наносят на различные

электрические контакты. Среди них меднение, хромирование, никелирование, серебрение, золочение и другие.

Меднение в основном применяют как подслоя при нанесении никеля, хрома, серебра и золота, т. к. медные покрытия не обладают надежными антикоррозионными свойствами.

Хромирование используется для защиты от коррозии деталей из стали, меди, алюминия и никеля, а также для повышения отражательной способности поверхности (до 70 %), износостойкости, жаростойкости и твердости.

Серебряное покрытие, применяется в основном для улучшения электропроводности поверхности деталей. Оно способствует коррозионной стойкости против щелочей и некоторых органических кислот.

Золотое покрытие применяют для защиты от внешних воздействий, повышения износостойкости и увеличения электропроводности деталей наиболее ответственного назначения, электрических контактных пар, электрических выводов интегральных схем и др.

Никелевое покрытие широко применяется как защитно-декоративное покрытие деталей, работающих в легких и средних условиях эксплуатации. Это покрытие имеет высокую механическую прочность, коррозионную стойкость и красивый внешний вид [4]. Рассмотрим никелевые покрытия, которые наиболее эффективны при нанесении на медь. Пара *Cu-Ni* идеально сочетаются при гальваническом нанесении.

Гальваническое никелирование осуществляется путем осаждения никеля на подложку посредством электролиза. Никель, благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность и отличная адгезия, образует толстый и прочный слой, что делает его идеальным выбором для защиты меди от окисления и износа [5]. Никелирование обладает множеством преимуществ. Этот процесс позволяет надежно защищать поверхности от воздействия атмосферной коррозии, растворов органических кислот, а также солевых и щелочных сред. Кроме того, никелированная поверхность отличается привлекательным внешним видом, являясь блестящей и гладкой на ощупь [6]. Также стоит отметить, что как сам никель, так и его соединения абсолютно безопасны с точки зрения экологии.

Недостатком гальванического никелирования является то, что слой никеля точно

повторяет рельеф поверхности подложки (рис. 1). Ввиду малых размеров электрических контактов получить механически более качественную поверхность не представляется возможным или является очень дорогостоящей операцией. Повторение слою никеля геометрии подложки определяет геометрию поверхностного слоя соединителя в целом. Следствием этого является то, что площадь контакта электрического соединителя в сопряжении определяется микрогеометрией подложки. Площадь фактического контакта влияет не только на электропроводимость соединителя, но и на долговечность электрического соединителя, т.к. чем больше площадь фактического контакта, тем больше коэффициент трения покоя, больше устойчивость соединителей к вибрациям и больше число циклов соединения – разъединения.

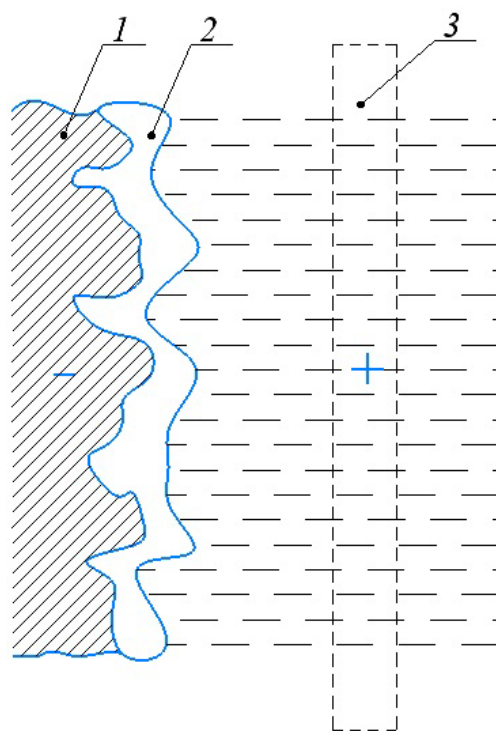


Рис. 1. Схема после нанесения покрытия:

1 – катод; 2 – слой нанесения никеля; 3 – анод

Fig. 1. Scheme after coating:

1 – cathode; 2 – nickel deposition layer; 3 – anode

В работе представлена технология, позволяющая получить никелированное покрытие электрических соединителей с улучшенным

качеством поверхности. Это позволит обеспечить большую площадь фактического контакта в соединении, чем при традиционном

гальваническом никелировании и, как следствие, большие значения коэффициента трения покоя и долговечности готового изделия.

Материалы и методы исследований

Гальванический технологический процесс никелирования электрических соединителей включает нанесение слоя на медную подложку посредством электрохимического осаждения. Основные этапы процесса включают (рис. 2): проведение визуального осмотра обрабатываемой детали для выявления наличия покрытий и оценки состояния поверхности; выполнение процедуры обезжиривания, травления и активации поверхности детали; никелирование подложки осуществляется в специализированной ванне с электролитом, к которой

подключается один или два анода, в зависимости от характеристик ванны и состава электролита и деталь, присоединенная к катоду, помещается в ванну; активируется подача электрического тока, под воздействием которого ионы солей металла направляются к изделию с отрицательным зарядом; на всей поверхности изделия равномерно оседает тонкий слой металла; по завершении гальванического процесса подача электрического тока прекращается, изделие извлекается, тщательно промывается и сушится; при необходимости может быть подвергнуто дополнительной обработке. Заключительным этапом является контроль полученных характеристик (от адгезии до блеска, от теплопроводности до антикоррозионных качеств).

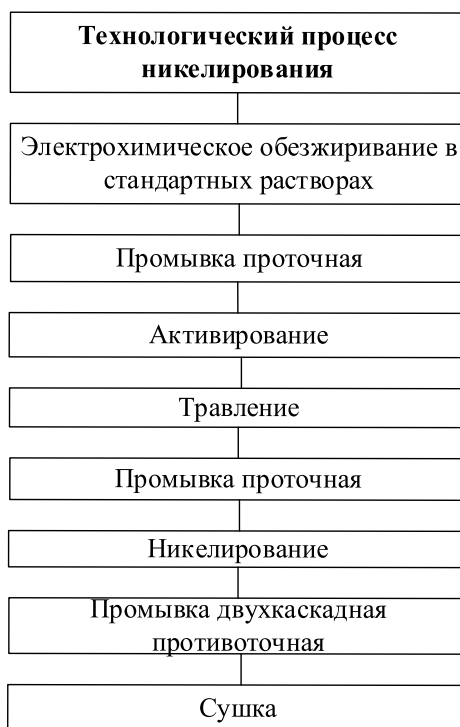


Рис. 2. Схема технологического процесса никелирования

Fig. 2. Diagram of nickel plating technical process

Результаты и обсуждение

Дополнительная технологическая операция позволит улучшить качество поверхности электрического контакта, увеличить

площадь фактического касания, коэффициент трения покоя и долговечность. Такой операцией может быть электрохимическое шлифование (рис. 3).

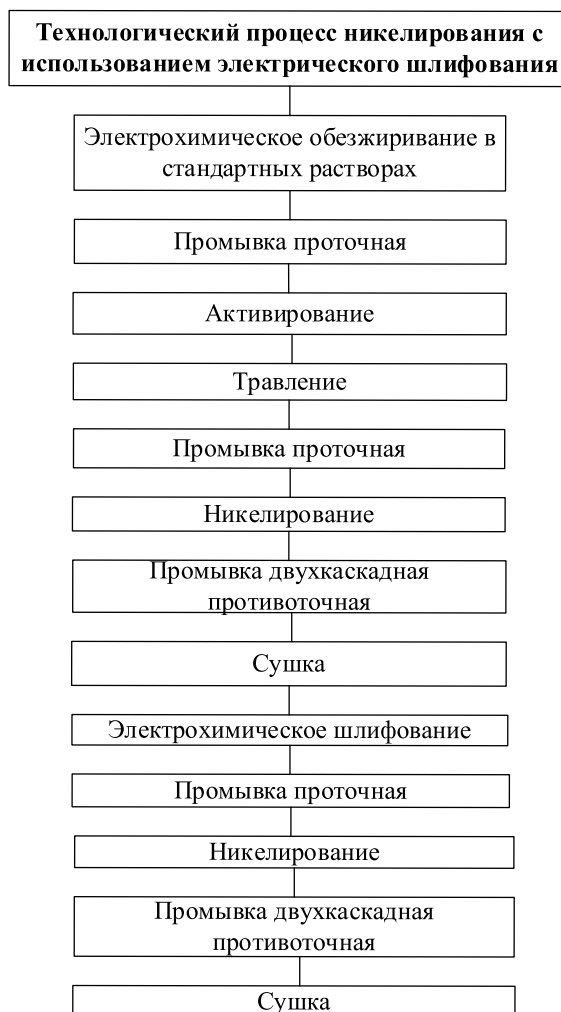


Рис. 3. Технологический процесс никелирования с использованием электрохимического шлифования

Fig. 3. Technical process of nickel plating using electrochemical grinding

Электрохимическое шлифование обладает следующими достоинствами:

- увеличивает прочность и препятствует появлению ржавчины на поверхности металла;
- позволяет снизить время шлифования поверхности заготовки;
- благодаря высокой производительности, во время обработки металла не нарушаются основные конструкции изделия;
- ускоряет процедуру производства шлифования.

Электрохимическое шлифование является процессом, противоположным гальваническому осаждению металлов: обрабатываемая деталь выступает в роли анода и помещается в электролитическую ванну, где при определённых условиях (плотность тока, температура и время погружения) происходит удаление

металла. Анодное растворение применяется в таких операциях, как очистка металлической поверхности, удаление заусенцев и грата, а также заострение и шлифование. Данный процесс позволяет установить ключевые критерии качества поверхностного слоя, такие как макро- и микрогеометрия, наклеп, микроструктура и остаточные напряжения. Эксплуатационные характеристики деталей машин и механизмов, включая усталостную прочность, отражательные свойства, теплоизлучение и теплопоглощение, а также обтекаемость жидкостями и газами и коррозионную стойкость, находятся в прямой зависимости от этих критериев [7]. При внесении изменений в технологический процесс никелирования предлагается проводить частичное электрохимическое шлифование поверхности с повторным нанесением никелирования на полученную поверхность.

При этом, с целью экономии цветных металлов, существуют технологии, позволяющие собрать снимаемый слой никеля при гальваническом шлифовании и использовать цветной металл повторно.

Рассмотрим полный технологический процесс никелирования и внесем дополнительные изменения, связанные с проведением электрохимического шлифования:

1. Состав электрохимической ванны для проведения обезжиривания:

1.1. Карбонат натрия (технический) – концентрация – 35 г/л;

1.2. Тринатрий фосфат – концентрация – 40 г/л ;

При режиме работы процесса электрохимического обезжиривания температура состава составляет 40 °С, при постоянной подаче тока $i^k = 5 \text{ А/дм}^2$, при этом напряжение составляет 12 В, время проведения электрохимического обезжиривания 3 мин;

2. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 50 °С;

3. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 20 °С;

4. Химическое травление, состав:

4.1. Серная кислота – концентрация – 1100 г/л;

4.2. Нитрат аммония – концентрация – 275 г/л;

Химическое травление производится на протяжении 1 мин, при температуре состава 25 °С;

5. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 20 °С;

6. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет $t = 50 \text{ °С}$;

7. Состав гальванической ванны для проведения никелирования приведен в табл. 1:

1. Состав гальванической ванны для проведения никелирования

1. Composition of the galvanic tank for nickel plating

Состав	Концентрация, г/л
Сульфат никеля	250
Хлорид никеля	15
Борная кислота	30
Сахарин	0,3
Нафталин	2,0
Моющее средство	0,2

Никелирование производится при постоянном токе $i^k = 4 \text{ А/дм}^2$ кислотно-основных свойств раствора $\text{pH} = 4...5$ и температуре 20 °С с доведением толщины слоя в 20 мкм, при этом необходимо установить время нахождения элемента в электролите на протяжении 2 ч 4 мин. Результат нанесения гальванического покрытия никеля на медную подложку толщиной в 20 мкм схематично показан на рис. 1;

8. Промывка – улавливание производится при температуре 20 °С, на протяжении 1 мин;

9. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 20 °С;

10. Промывка в теплой воде

производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 50 °С;

11. Сушка элемента на протяжении 5 мин, при температуре 70 °С;

12. Электрическое шлифование;

12.1. Для электрохимического шлифования электролитом служит серная кислота марки «химически чистая» или «аккумуляторная» [8]. Очень важно отсутствие или малое содержание в ней хлор-иона. Техническая серная кислота непригодна. Никаких добавок в электролите не требуется. Предпочтительно применять 30 % кислоту, так как при этой концентрации раствор обладает наивысшей электропроводностью, что выгодно в отношении экономии расхода электроэнергии, минимально

требуемого напряжения повышенной рассеивающей способности, возможности работы при большой плотности тока (при которой нагрев джоулевой теплотой невелик вследствие малого омического сопротивления раствора), и значительной растворимости меди в кислоте такой концентрации [9]. Благодаря этому оно не выпадает в осадок и не мешает процессу. Температура раствора должна быть комнатной (18...20 °С), допустимо повышение до 30 °С. При высоких температурах медь не пассивируется. Медь пассивируется на аноде в серной кислоте, только при значительно более высокой плотности тока – при работе в аккумуляторной серной кислоте плотность тока должна быть не меньше 30...35 А/дм². Верхний предел плотности тока ограничен только мощностью источника тока и опасностью разогрева электролита джоулевой теплотой [10].

12.2. Электрическое шлифование производится с возможностью частичного снятия слоя никеля до 10 мкм, при этом необходимо производить периодический контроль снятия поверхности. Результат проведения электрического шлифования никеля со снятием слоя до 10 мкм схематично показан на рис. 4;

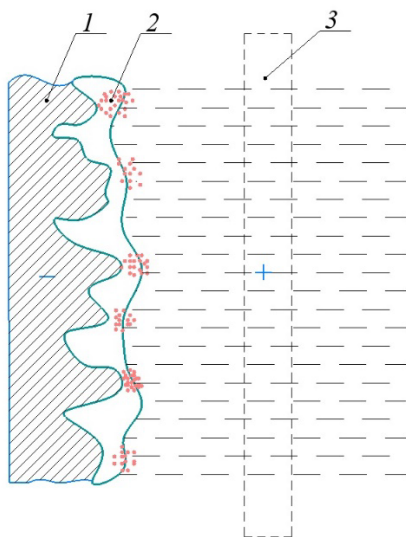


Рис. 4. Схема при проведенном электрическом шлифовании и полученной толщине в 10 мкм: 1 – катод; 2 – слой никеля при электрическом шлифовании; 3 – анод

Fig. 4. Scheme for electric grinding and the resulting thickness of 10 microns:

1 – cathode; 2 – nickel layer during electric grinding; 3 – anode

13. Повторное никелирование производится в тех же условиях с изменением времени до 1 ч 2 мин и доведением толщины слоя в 20 мкм. На рис. 5 схематично показан результат нанесения гальванического покрытия никеля на медную подложку после электрического шлифования толщиной в 20 мкм.

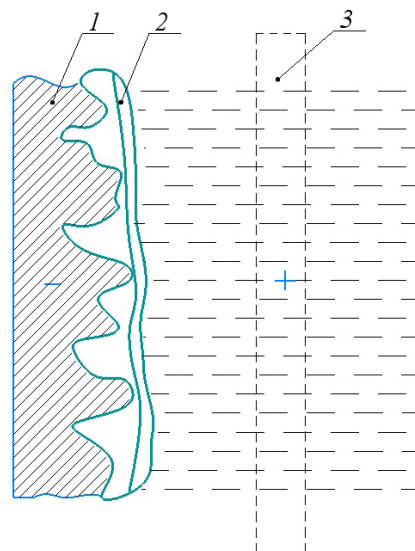


Рис. 5. Схема поверхности электрического контакта при повторном нанесении никелирования:

1 – катод; 2 – слой нанесения никеля в 20 мкм; 3 – анод

Fig. 5. Diagram of the electrical contact surface during nickel plating reapplication:

1 – cathode; 2 – nickel deposition layer of 20 microns; 3 – anode

14. Промывка – улавливание производится при температуре 20 °С, на протяжении 1 мин;

15. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 20 °С;

16. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет $t = 50$ °С;

17. Сушка элемента на протяжении 5 мин, при температуре 70 °С.

Таким образом, полученная поверхность покажет минимальное число трещин, глубоких царапин и вмятин на поверхности изделия, что в свою очередь увеличивает электрическую проводимость, поверхностное соединение контактных электрических соединителей, снижает возникающее при соединении контактов электрическое сопротивление

(рис. 5), и повышает качество полученного поверхностного слоя контакта.

Заключение

Повторное никелирование необходимо для увеличения площади контакта, поэтому необходимо дополнительно применять в технологическом процессе никелирования электрохимическую шлифовку, с использованием следующего технологического процесса:

1. Заготовка размещается в ванне с регулируемым электролитом и выполняет функцию анода. Она соединяется с положительной клеммой источника постоянного тока, в то время как отрицательная клемма подключена к катоду.

2. Ток движется от анода, где происходит окисление металла на поверхности, что приводит к его растворению в электролите, к катоду.

3. На катоде осуществляется процесс восстановления, в ходе которого обычно выделяется водород.

4. Электролит проникает через поры покрытия к металлической подложке детали и растворяет её.

5. За счет свойств электролита с вершин изображенных на рис. 4 слой никеля снимается, в то время как на углублениях задерживается.

6. Происходит выравнивание поверхности, с течением времени.

За счет увеличения площади фактического контакта между электрическими соединителями увеличится коэффициент трения покоя в данном сопряжении, что приведет к увеличению ресурса неразъемных соединителей, работающих в условиях вибрации, или разъемных соединителей в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
2. **Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.**

3. Дербуш Д.А., Шалыгин М.Г., Евтух Е.С. Обзор технологий улучшения эксплуатационных показателей контактных электрических соединителей // Транспортное машиностроение. 2024. №. 10. С. 4–11.

4. Асталоюхина А.С., Пикалов Е.С. Обзор путей повышения эффективности современных гальванических производств // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 7–8. EDN VLCYWJ

5. Шумов О.В. Повышение эксплуатационных свойств защитных покрытий на основе меди // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2008. № 8. С. 22–23. EDN UYZYJC

6. Асталоюхина А.С., Пикалов Е.С. Обзор видов нанесения и эксплуатационных характеристик защитных гальванических покрытий // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. 2015. № 4-2. С. 111–114. EDN UMKAWF

7. Хмелева К.М., Козлов И.А., Никитин Я.Ю., Никифоров А.А. Современные тенденции защитных гальванических покрытий, работающих при повышенных температурах (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). С. 85–86. DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86. EDN ASXQRJ

8. Виноградов С.С., Балахонов С.В., Демин С.А., Кириллова О.Г. Влияние шлифования композиционного покрытия на его электрохимическое поведение в коррозионной среде // Коррозия: материалы, защита. 2016. № 1. С. 44–47. EDN VHXB0X

9. Гурьев А.А., Сафонова Д.С. Роль электролита в процессе электрохимического шлифования // Механика XXI века. 2012. № 11. С. 239–241. EDN RDHISV

10. Апарин В.М., Уткевич А.М., Каневский Ю.Л., Зайцев А.А. Авторское свидетельство № 545442 А1 СССР, МПК В23Р 1/16. Электролит для электрохимического шлифования : № 2309811 : заявл. 08.12.1975 : опубл. 05.02.1977 / заявитель предприятие П/Я Р-6793. EDN NFDBPL

REFERENCES

1. Suslov, A. G. The quality of the surface layer of machine parts / A. G. Suslov. Moscow: Scientific and Technical Publishing House «Mashinostroeniye», 2000, 320 p.
2. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of machine-building products / ed. by A.G. Suslov. - Moscow: Innovative engineering, 2022, 552 p.
3. Derbush D.A., Shalygin M.G., Evtukh E.S. Overview of technologies to improve performance criteria of contact electric connectors // Transport Engineering. 2024. No. 10, pp. 4–11.
4. Astalyukhina A.S., Pikalov E.S. Summary of ways to enhance the effectiveness of modern galvanic production // Successes of modern natural science. 2016. No. 1, pp. 7–8. EDN VLCYWJ
5. Shumov O.V. Improving the operational properties of copper-based protective coatings // Bulletin of Polotsk

State University. Series B. Industry. Applied sciences. 2008. No. 8, pp. 22–23. EDN UYZYC

6. Astalyukhina A.S., Pikalov E.S. Review of the types of application and operational characteristics of protective electroplating coatings // New science: Experience, traditions, innovations. 2015. No. 4-2, pp. 111–114. EDN UMKAWF

7. Khmeleva K.M., Kozlov I.A., Nikitin Ya.Yu., Nikiforov A.A. Modern trends of protective galvanic coatings working at high temperatures (review) // Proceedings of VIAM. 2020. No. 12 (94), pp. 85–86. DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86. EDN ASXQRJ

8. Vinogradov S.S., Balakhonov S.V., Demin S.A., Kirillova O.G. The influence of polishing of a composite

coating on its electrochemical behavior in a corrosive medium // Corrosion: materials, protection. 2016. No. 1, pp. 44–47. EDN VHXBOX

9. Guryev A.A., Safonova D.S. The role of electrolyte in the process of electrochemical grinding // Mechanics of the 21st century. 2012. No. 11, pp. 239–241. EDN RDHISV

10. Aparin V.M., Rutkevich A.M., Kanevsky Yu.L., Zaitsev A.A. Copyright certificate No. 545442 A1 USSR, IPC B23P 1/16. Electrolyte for electrochemical grinding : No. 2309811 : application 08.12.1975 : published 05.02.1977 / applicant COMPANY P/I R-6793. – EDN NFDBPL

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 22.12.2024; одобрена после рецензирования 12.01.2025; принята к публикации 14.02.2025.

The article was submitted 22.12.2024; approved after reviewing 12.01.2025; accepted for publication 14.02.2025.

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

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

Сдано в набор 17.04.2025. Выход в свет 30.04.2025.

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

