

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**2 (152)**  
**2024**

**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
И КОМБИНИРОВАННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

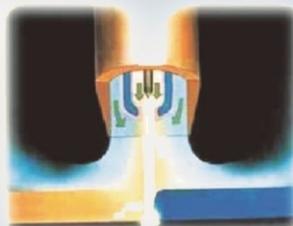
**ЛАЗЕРНЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ**



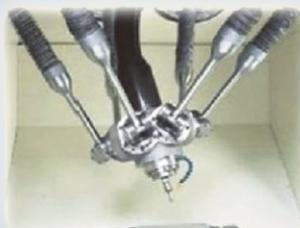
**ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В СВАРОЧНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ  
ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ  
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ**

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**№ 2 (152)**

**2024**

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

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Яцко Д.С. Исследование влияния органических связующих на  
микроструктуру образцов лазерной порошковой наплавки  
порошков SmFe в магнитном поле . . . . . 3

### ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Нечай А.А., Сухов А.В., Фатюхин Д.С., Фомушкина С.А. Анализ  
возможностей оптимизации выбора ультразвукового оборудования  
для нанесения функциональных покрытий . . . . . 12

Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Технология  
и результаты изучения взаимодействия поверхности с потоком  
заряженных частиц низкотемпературной плазмы . . . . . 20

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

Куксенова Л.И., Алексеева М.С. Прогнозирование и оценка  
триботехнической эффективности азотированного слоя деталей машин. . . . . 28

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Цыденов В.Д. Роботизация в авиастроении . . . . . 41

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

# SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

**№ 2 (152)**

**2024**

**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. SHOHIYON 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**

### **MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Yatsko D.S.** Study of organic compounds effect on samples microstructure  
of laser powder surfacing for SmFe powders in a magnetic field ..... 3

### **TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING**

**Nechai A.A., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S., Fomushkina S.A.** Exploratory study  
for optimization of the choice of ultrasonic equipment for the deposition  
of functional coatings ..... 12

**Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V.** Technology and results  
of studying the surface interaction for charged particles flow in  
low-temperature plasma ..... 20

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

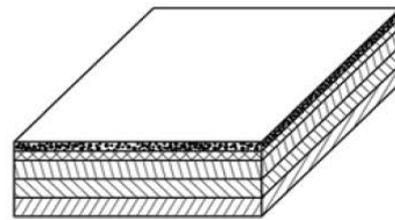
**Kuksenova L.I., Alekseeva M.S.** Forecasting and assessment of tribotechnical  
efficiency of the nitration case of machine parts ..... 28

### **TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS**

**Tsydenov V.D.** Robotechnics in the aircraft industry ..... 41

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. 2024. №2 (152). С.3-11.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №2 (152). P.3-11.

Научная статья  
УДК 620.186  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-2-3-11

### Исследование влияния органических связующих на микроструктуру образцов лазерной порошковой наплавки порошков SmFe в магнитном поле

Дмитрий Сергеевич Яцко, мл. науч. сотр.

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения  
Российской академии наук, Владивосток, Россия

d.s.yatsko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1761-2540>

**Аннотация.** В работе представлено два основных направления повышения эффективности постоянных магнитов (ПМ), за счёт изменения химического состава будущего магнита и за счёт изменения формы магнитного поля. Повышение эффективности ПМ за счёт изменения химического состава на протяжении десятилетий позволяло многократно уменьшить размер конечного изделия. В свою очередь, повышение эффективности ПМ за счёт изменения формы магнитного поля является сравнительно новым направлением. На основании анализа представленных способов повышения эффективности ПМ предлагается использовать аддитивные технологии, а именно лазерную порошковую наплавку, для изготовления постоянных магнитов. Для проведения экспериментальных исследований использован роботизированный комплекс KUKA и постоянные магниты в качестве источника постоянного магнитного поля. В работе представлены режимы лазерной порошковой наплавки порошков Sm и Fe. Для поддержания постоянного магнитного поля использован комплекс из шести неодимовых магнитов. Описано распределение напряжённости магнитного поля между магнитами и в основной рабочей области. Представлен внешний вид и состояние порошков, используемых для изготовления экспериментальных образцов. Описаны экспериментальные образцы и принцип отбора проб для проведения анализа микроструктуры и спектров концентрации элементов. У полученных образцов исследована микроструктура и распределение элементов в зависимости от ориентации образцов относительно магнитного поля и направления лазерной наплавки. Установлено влияние применяемых органических связующих на микроструктуру и химический состав. Исследовано распределение элементов в образцах и переходном слое между подложкой и наплавленным металлом.

**Ключевые слова:** лазерная порошковая наплавка, сплав SmFe, волоконный лазер

**Благодарности:** автор работы выражает благодарность коллективу ЦЛТ ИАПУ ДВО РАН за помощь в редактировании материалов публикации.

**Для цитирования:** Яцко Д.С. Исследование влияния различных связующих на микроструктуру образцов лазерной порошковой наплавки порошков SmFe в магнитном поле // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 2 (152). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

## Study of organic compounds effect on samples microstructure of laser powder surfacing for SmFe powders in a magnetic field

Dmitry S. Yatsko, SRF

Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia  
d.s.yatsko@mail.ru

**Abstract.** The paper presents two main directions for improving the efficiency of permanent magnets (PM), by changing chemical composition of the future magnet and through variations of magnetic field shape. Increasing the efficiency of PM by changing chemical composition over the decades has made it possible to reduce multiply the size of the final product. In turn, increasing the efficiency of PM by alternating the magnetic field shape is a relatively new direction. Based on the analysis of the presented methods for increasing the efficiency of PM, it is proposed to use additive technologies, namely laser powder surfacing for the manufacture of permanent magnets. To conduct experimental studies, the KUKA robotic complex and permanent magnets are used as a source of a permanent magnetic field. The paper presents some modes of laser powder surfacing of Sm and Fe powders. A complex of six neodymium magnets is used to maintain a magnetostatic field. Strength distribution of the magnetizing field between the magnets and in the main working area is described. The external view and condition of the powders used for the manufacture of experimental samples are presented. Experimental samples and selective approach for analyzing the microstructure and concentration spectra of elements are described. The microstructure and distribution of elements in the obtained samples were studied depending on the texture of the sample relative to the magnetic field and laser surfacing mode. The effect of the applied organic binders on the microstructure and chemical composition has been determined. The distribution of elements in the samples and the transition layer between the support plate and the deposited metal is studied.

**Keywords:** laser powder surfacing, SmFe alloy, fiber laser

**Acknowledgements:** the author of the work expresses gratitude to the staff of the CDT IAPA FEB RAS for their help in editing the materials of the publication

**For citation:** Yatsko D.S. Study of organic compounds effect on samples microstructure of laser powder surfacing for SmFe powders in a magnetic field / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 2 (152). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

### Введение

Материалы, обладающие магнитными свойствами, являются одной из важнейших частей того мира, что построило человечество. Постоянные магниты (ПМ) используются в технике, электронике, промышленности и науке. Одними из важнейших способов применения постоянных магнитов стали электрогенераторы, благодаря которым происходит выработка электроэнергии.

На данный момент можно выделить два основных направления развития постоянных магнитов, а именно: изменение химического

состава магнита и изменение формы магнитного поля. Процесс развития состава постоянных магнитов и их «эффективность» относительно своей массы представлен на рис. 1, а, где  $W_{\text{max}}$  – максимальное энергетическое произведение, определяющее, насколько сильным является магнит.

Размер магнита на основе редкоземельных металлов более чем в 60 раз меньше, чем магнит на основе алюминия, что видно из рис. 1, б. Несмотря на значительную разницу в размере магнитов напряжённость магнитного поля на расстоянии 5,0 мм от кромки у магнитов идентична.

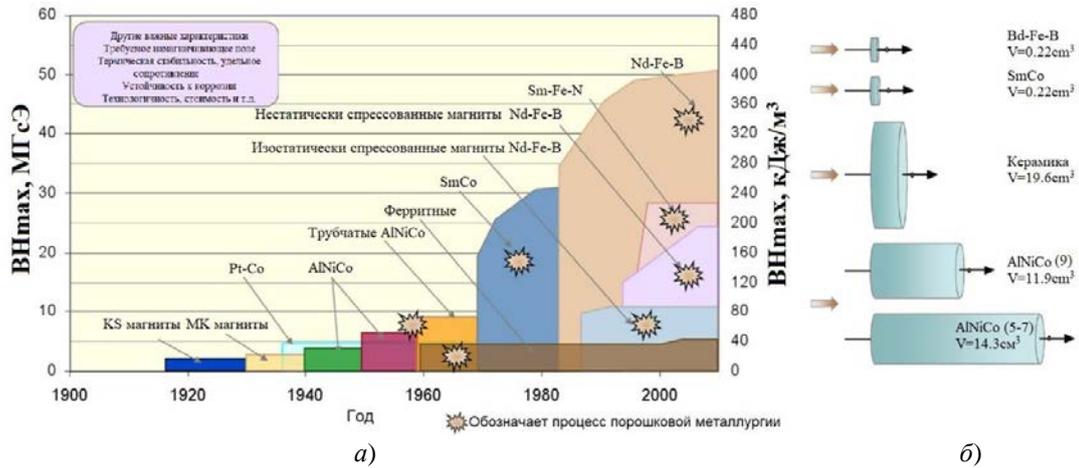


Рис. 1. Развитие постоянных магнитов [1]:  
а – сравнение мощности; б – сравнение размеров магнитов

Fig. 1. Development of permanent magnets [1]:  
а – contrast of power; б – comparison of magnet sizes

Однако помимо состава и характеристик постоянных магнитов значительный вклад в эффективность работы техники вносит форма магнитного поля. В работе [2] утверждается, что изменение формы магнитного поля за счёт изменения расположения магнитов (рис. 2, а) приводит к значительному приросту производительности и крутящего момента в двигателе (рис. 2, б). Также интерес

представляют и другие работы [3 – 6], направленные на изучение и разработку технологий увеличения эффективности оборудования, использующего постоянные магниты. Аналогичные исследования ведутся в области разработки новых способов применения постоянных магнитов [7], исследуются принципы формирования магнитных свойств [8], их структура [9] и свойства [10].

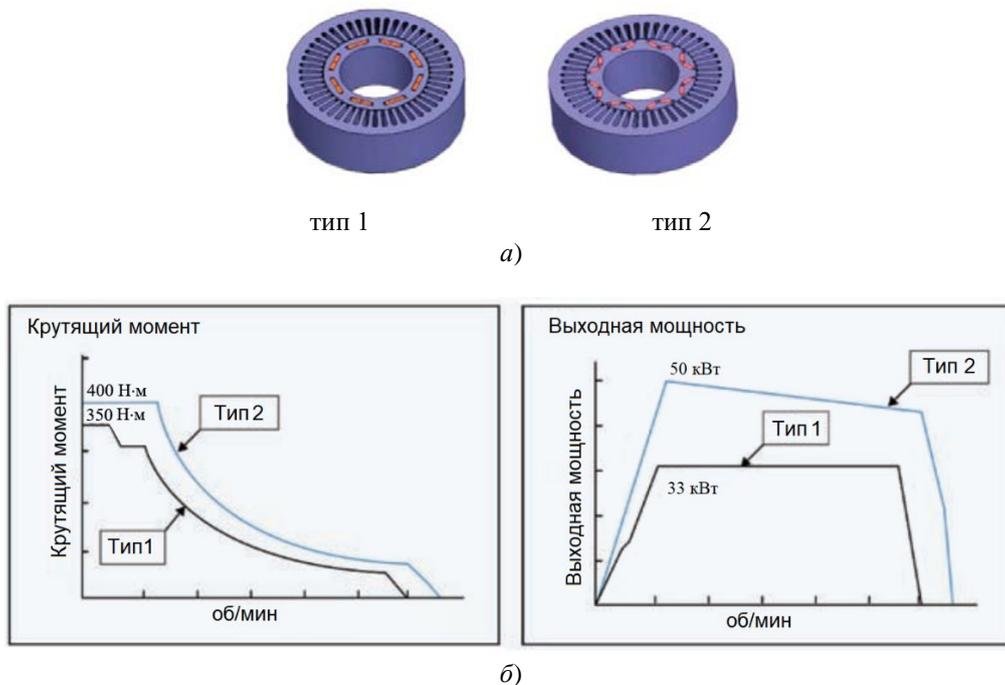


Рис. 2. Зависимость производительности двигателя от формы магнитного поля:  
а – варианты расположения магнитов в устройстве; б – изменение производительности

Fig. 2. Dependence of motor performance on magnetic field shape:  
а – options for the arrangement of magnets in the device; б – change in performance

### Цель и задачи

Целью данной работы является изучение влияния органических связующих, применяемых для фиксации порошков в магнитном поле при лазерной порошковой наплавке.

Для получения более углублённого понимания происходящих процессов были поставлены следующие задачи:

- изучить влияние связующего на микроструктуру и состав получаемых образцов;
- определить влияние направления линий магнитной индукции на структуру получаемых образцов.

### Материалы и методики

Для углублённого изучения процессов, происходящих при изготовлении ферромагнитных материалов, методом лазерной аддитивной технологии, были проведены исследование

структуры, состава и магнитных свойств получаемых образцов.

Для изготовления образцов использован технологический комплекс, ключевыми элементами которого являются волоконный лазер производства IPG марки ЛС-1-К и робот KUKA KR 30 HA. Волоконный лазер является источником лазерного излучения, которое используется для плавления порошков, находящихся в магнитном поле. Робот KUKA передвигает лазерное излучение по поверхности порошка, что позволяет получать магнитный материал в соответствии с 3D моделью.

Используемый лазер позволяет контролировать такие параметры лазерного излучения как:

- мощность лазерного излучения;
- диаметр пятна лазерного излучения;
- длительность импульса (при импульсной обработке).

Основные параметры лазера приведены в табл. 1.

## 1. Основные характеристики волоконного лазера

### 1. Main characteristics of fiber laser

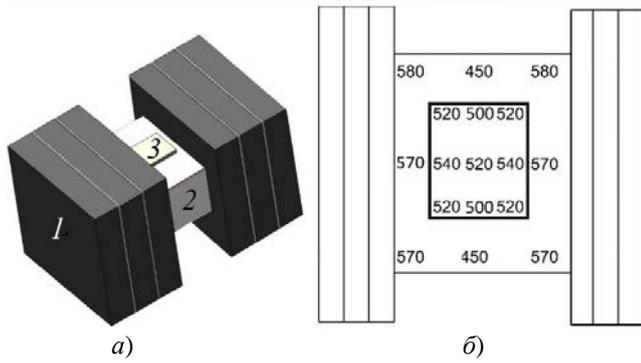
Характеристика	Значение
Мощность лазерного излучения	100...1000 Вт
Длина волны	1070,07 нм
Расходимость	31,377 мрад
Диаметр пятна в фокусе	0,75 мм

Промышленный робот KUKA KR 30 в совокупности с позиционером ДКР-400 являются базой используемой установки. На последнем (шестом) фланце робота крепится оптическая головка, которая перемещается в пространстве, согласно заданным координатам.

В оптимальных рабочих условиях повторяемость робота составляет порядка 50 нм, а позиционера  $0,009^\circ$  что позволяет выполнять запрограммированные операции с высокой точностью.

При работе со сложными геометрическими поверхностями образец крепится в позиционер, что позволяет поворачивать обрабатываемую деталь в процессе работы. А при работе с простыми поверхностями образец располагается на столе возле робота.

Для поддержания постоянного магнитного поля использован комплекс из шести неодимовых магнитов размером  $100 \times 100 \times 10$  мм<sup>3</sup>, собранных в два пакета по три штуки (рис. 3, а). Магнитная индукция между магнитами изменяется от 450 до 580 мТл в зависимости от места измерения (рис. 3, б). Пакеты разделены немагнитным материалом, на поверхности которого закреплена немагнитная подложка. Сплавление порошкового материала проводится лазерным излучением в присутствии магнитного поля на поверхности немагнитной подложки. Квадратом (см. рис. 3, б) выделена область наиболее стабильного магнитного поля (500...540 мТл).



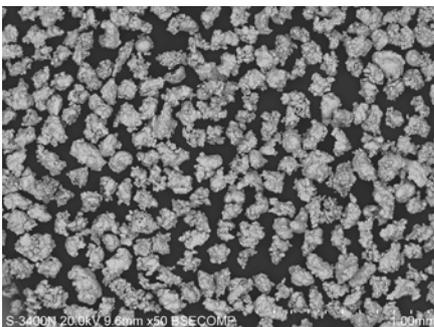
**Рис. 3. Комплект магнитов, создающих магнитное поле:**  
а – общий вид: 1 – пакет магнитов; 2 – немагнитный блок, разделяющий пакеты магнитов; 3 – немагнитная подложка, на которой производится наплавка;  
б – распределение напряжённости магнитного поля (мТл)

**Fig. 3. A set of magnets creating a magnetic field:**  
а – general view: 1 – a package of magnets; 2 – a non-magnetic block separating packages of magnets; 3 – a non-magnetic support plate for making the surfacing;  
б – strength distribution of the magnetic field (mTl)

Для получения образцов использованы порошки частых металлов, а именно самарий (рис. 4, а), кобальт, железо (рис. 4, б).



а)



б)

**Рис. 4. Пример общего вида порошков, использованных в работе:**  
а – самарий  $\times 50$ ; б – железо  $\times 50$

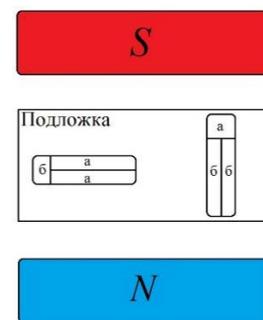
**Fig. 4. An example of powder general type used in the work:**  
а – samarium  $\times 50$ ; б – iron  $\times 50$

Так как порошки взаимодействуют с магнитным полем использовать стандартную технологию лазерной порошковой наплавки невозможно. Для фиксации порошка на поверхности образца использовалось два метода.

Первый метод заключался в фиксации порошка на поверхности спиртовым раствором канифоли (индекс «К»), состоящем из 10 г канифоли и 50 мл изопропилового спирта. Раствор канифоли смешивался со смесью порошков Sm-Fe (20/80) в соотношении 50 мл раствора на 50 г смеси порошков. Полученная масса наносилась на обезжиренную пластину из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и высушивалась в сушильном шкафу в среде аргона при температуре 100 °С на протяжении 60 мин до полного высыхания. Полученную смесь сплавляли лазерным излучением в магнитном поле.

Второй способ фиксации порошка на поверхности образца заключался в нанесении на обезжиренную подложку полистирола (индекс «П»). На поверхность с полистиролом с помощью пневматического компрессора наносилась смесь порошков Sm-Fe.

Изготовление образцов проводилось в двух направлениях. Вдоль (от магнита к магниту) и поперёк направления линий магнитного поля (между магнитами), как показано на рис. 5.



**Рис. 5. Схематичное обозначение ориентации образцов**

**Fig. 5. Schematic designation of samples texture**

Режим лазерной порошковой наплавки были следующими: мощность лазерного излучения 600 Вт; диаметр пятна лазера на поверхности 1,0 мм; скорость движения луча по поверхности 0,02 м/с; толщина слоя порошка перед наплавкой 1,0 мм; защитная газовая среда – аргон.

Структура полученных образцов исследована на сканирующем электронном

микроскопе Hitachi S3400 type II после предварительного травления ионным лучом для выявления границ зерна и определения их элементного состава методом рентгеновской спектроскопии с энергетической дисперсией (РСЭД). Образцам, наплавленным вдоль магнитного поля, были присвоены номера 1а и 1б. Образцам, наплавленным поперёк магнитного поля, были присвоены номера 2а и 2б. Буквы «а» и «б» присваивались в соответствии с направлением линий магнитных индукции при наплавке образцов. У образцов с буквой «а» магнитное поле расположено перпендикулярно плоскости шлифа, у образцов с буквой «б» параллельно. Перед номером образца добавлялось буквенное обозначение фиксирующего состава, например, образец К1а – наплавлен вдоль магнитного поля с использованием раствора канифоли.

### Результаты и обсуждение

Для определения влияния используемых фиксирующих составов на структуру и состав проведены исследования на электронном

микроскопе. На рис. 6 представлена микроструктура образцов наплавки порошков SmFe на подложке из нержавеющей стали.

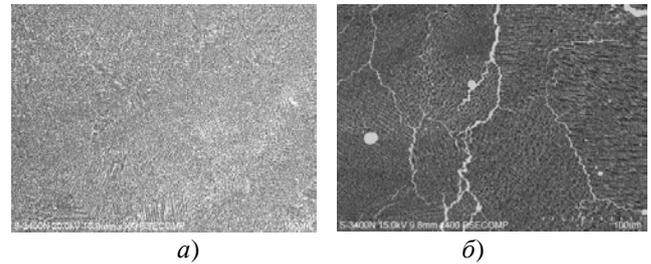


Рис. 6. Микроструктура образцов П1а (а) и К1а (б)

Fig. 6. Microstructure of samples P1a (a) and K1a (b)

Известно, что работа выхода электронов из редкоземельных металлов (Sm, например) значительно меньше, чем переходных металлов. Регистрация спектра РСЭД в точке 1 (рис. 7, а) показала, что основной вклад дает Fe – 71 % весовой и 70,1 % атомный, а вклад Sm – 6,4 % весовой и 2,3 % атомный меньше, чем вклад атомов Cr – 19,1 % весовой и 20,3 % атомный.

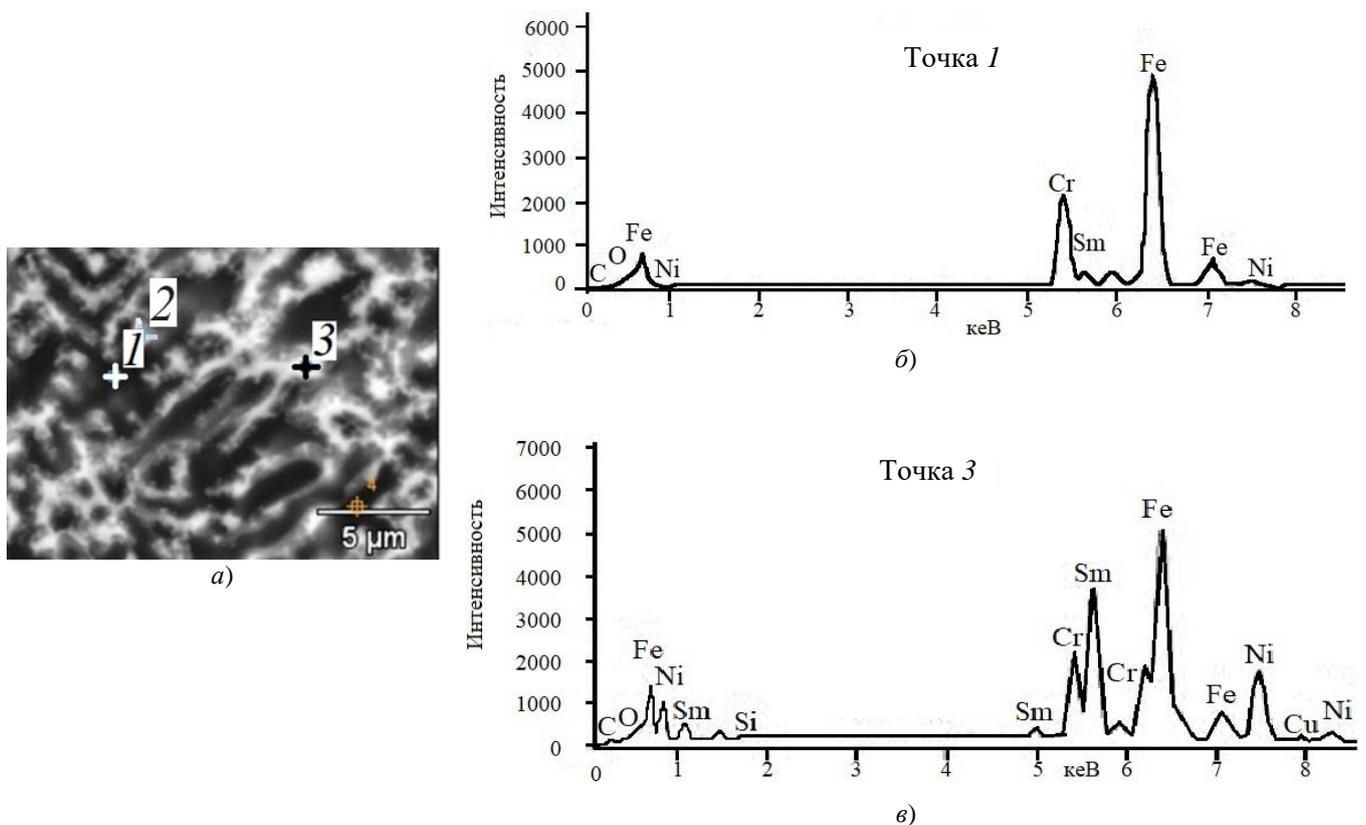


Рис. 7. Спектры концентрации элементов (а) в точках 1 (б) и 3 (в) образца К1а

Fig. 7. Spectra of the concentration of elements (a) at points 1 (b) and 3 (c) of the sample K1a

Исследования состава в точке 3 (рис. 7, а) показали, что области с белым цветом содержат 43,6 % весовых и 20 % атомных Sm, а также 29,4 % весовых и 36,3 % атомных Fe. В состав участка также входят небольшие количества атомов Ni – 15,1 %, Cr – 8,3 % и до 1,5 % атомов C, Si и Cu.

Можно сказать, что при кристаллизации в магнитном поле большая часть атомов самария располагаются в областях белого цвета, а в серые области Sm входит в незначительном количестве (единицы атомных процентов) самария. В образцах П1а и К1а также были обнаружены микротрещины, однако количество микротрещин в образце П1а ниже. Анализ микроstructures образцов П1а, П1б (рис. 8), К1а и К1б не выявил кардинальных отличий, указывающих на влияние направления линий магнитной индукции на микроstructure.

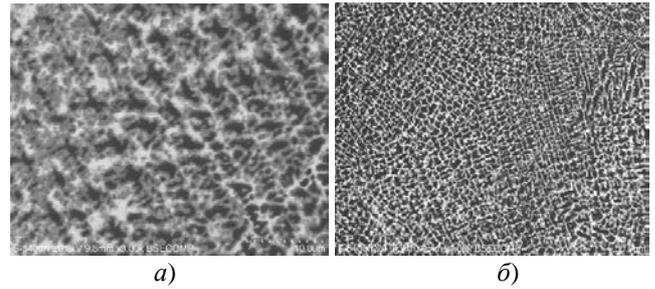


Рис. 8. Микроstructure образцов П1а (а) и П1б (б)

Fig. 8. Microstructure of samples P1a (a) and P1b (b)

При анализе переходной области между подложкой и наплавленным металлом была обнаружена взаимная диффузия элементов подложки и наплавленного металла (рис. 9).

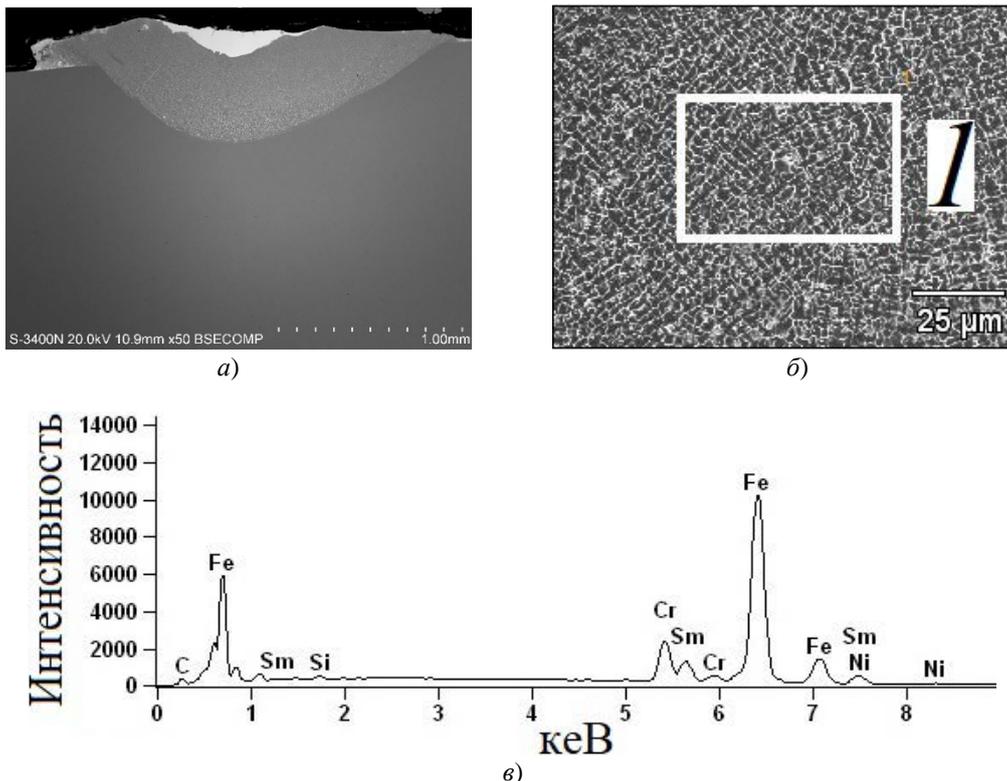


Рис. 9. Распределение элементов в поверхностном слое наплавленного металла образца П2а: а – поперечный срез образца; б – участок анализа РСЭД спектров; в – соотношение элементов на участке 1

Fig. 9. Distribution of elements in the surface layer of the deposited metal of the sample P 2a: а – cross section of the sample; б – section of the analysis of the EDRS spectra; в – the ratio of elements in section 1

В поверхностной области наплавленного металла (см. рис. 9, а) были обнаружены элементы подложки и скопление Sm, который

всплыл на поверхность. Регистрация РСЭД спектров выделенной области (см. рис. 9, б) показала (см. рис. 9, в) содержание 1,47 % весовых

и 6,96 % атомных атомов С, 0,34 % весовых и 0,68 % атомных атомов Si, 9,33 % весовых и 10,23 % атомных атомов Cr, 71,93 % весовых и 73,38 % атомных атомов Fe, 3,94 % весовых и 3,82 % атомных атомов Ni и 13,00 % весовых и 4,93 % атомных атомов Sm.

### Выводы

1. Для получения магнитных материалов методом лазерной порошковой наплавки в магнитном поле можно использовать оба изучаемых состава.

2. При использовании полистирола в качестве фиксирующего материала в исследуемой микроструктуре наблюдается меньшее количество трещин, чем при применении раствора каустифоли.

3. Направление линий магнитной индукции не оказывает видимого эффекта на изменение микроструктуры полученных образцов.

4. Из-за сильного смешивания наплавляемого металла и подложки происходит взаимная диффузия металлов. Для уменьшения данного эффекта необходимо пересмотреть режим лазерной обработки в сторону уменьшения количества используемой энергии.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Laura H. Lewis and Fe'Lix Jime'Nez-Villacorta.** Perspectives on Permanent Magnetic Materials for Energy Conversion and Power Generation // Metallurgical and Materials Transactions A 44-Suppl, January 2013. DOI: 10.1007/s11661-012-1278-2

2. **Oliver Gutfleisch, Matthew A. Willard, Ekkes Brück, Christina H. Chen, S. G. Sankar, and J. Ping Liu.** Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient // Advanced Materials 20:1-22 August 2011

3. **Практ В.А., Дмитриевский В.А., Казакбаев В.М.** Оптимальное проектирование безредукторной машины с переключением потока для ветрогенератора // Известия ТПУ. 2020. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-proektirovanie-bezreduktornoy-mashiny-s-pereklyucheniem-potoka-dlya-vetrogeneratora> (дата обращения: 16.11.2023).

4. **Шаповало А.А.** Комплекс организационно-технических решений по совершенствованию работы энергохозяйств дочерних обществ ПАО «Газпром» в современных условиях // Газовая промышленность. 2017. №11 (760). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleks-organizatsionno-tehnicheskikh-resheniy-po-sovershenstvovaniyu-raboty-energohozyaystv-dochernih-obschestv-pao-gazprom-v> (дата обращения: 14.11.2023).

5. **Нагайцев В.И., Сергеев С.В., Сизякин А.В.** Эволюция требований к свойствам материалов постоянных магнитов для электрических машин // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2021. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-trebovaniy-k-svoystvam-materialov-postoyannyh-magnitov-dlya-elektri-cheskih-mashin> (дата обращения: 14.11.2023).

6. **Валеев Р.А., Пискорский В.П., Королев Д.В., Моргунов Р.Б.** Оптимизация содержания кобальта как способ температурной стабилизации редкоземельных магнитов // Труды ВИАМ. 2023. №3 (121). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-soderzhaniya-kobalta-kak-sposob-temperaturnoy-stabilizatsii-redkozem-elnyh-magnitov> (дата обращения: 16.11.2023).

7. **Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н., Ратцев Я.А., Полянский Е.А.** Комбинированный магнитный подвес // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. № 4 (68). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kombinirovannyy-magnitnyy-podves> (дата обращения: 16.11.2023).

8. **Лукин А.А.** Особенности формирования высококоэрцитивного состояния в ПМ типа рзм-м // ГИАБ. 2007. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-vysokokoertsitivnogo-sostoyaniya-v-pm-tipa-rzm-m> (дата обращения: 16.11.2023).

9. **Чередниченко И.В., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Кузьмина Н.А., Шубаков В.С., Жуков Д.Г.** Структура и свойства сплавов для постоянных магнитов юндк25ба, полученных методом направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем // Труды ВИАМ. 2017. №11 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-i-svoystva-splavov-dlya-postoyannyh-magnitov-yundk25ba-poluchennyh-metodom-napravlennoy-kristallizatsii-s> (дата обращения: 16.11.2023).

10. **Чередниченко И.В., Бавина М.А., Бондаренко Ю.А., Шурыгин В.Д., Овчинников А.Д., Галимуллин С.А.** Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства постоянных магнитов из сплава юндкба // Труды ВИАМ. 2023. №11 (129). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-parametrov-napravlennoy-kristallizatsii-na-strukturu-i-svoystva-postoyannyh-magnitov-iz-splava-yundkba> (дата обращения: 07.02.2024).

### REFERENCES

1. **Laura H. Lewis and Fe'Lix Jime'Nez-Villacorta.** Perspectives on Permanent Magnetic Materials for Energy Conversion and Power Generation // Metallurgical and Materials Transactions A 44-Suppl, January 2013. DOI: 10.1007/s11661-012-1278-2

2. **Oliver Gutfleisch, Matthew A. Willard, Ekkes Brück, Christina H. Chen, S. G. Sankar, and J. Ping Liu.** Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient // Advanced Materials 20:1-22 August 2011

3. Prakht V.A., Dmitrievsky V.A., Kazakbaev V.M. Optimal design of gearless flux-switching Generator with Ferrite Permanent Magnets // *Izvestia TPU*, 2020, No.5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-proektirovanie-bezreduktornoy-mashiny-s-pereklyucheniem-potoka-dlya-vetrogeneratora> (date of access: 16.11.2023).

4. Shapoval A.A. Complex of technical-organizational decisions on improving the work of energy departments of the subsidiaries of Gazprom PJSC in current conditions // *Gas Industry*, 2017, no.11 (760). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleks-organizatsionno-tehnicheskikh-resheniy-po-sovshenstvovaniyu-raboty-energohozyaystv-dochernih-obschestv-pao-gazprom-v> (date of access: 14.11.2023).

5. Nagaitsev V.I., Sergeev S.V., Sizyakin A.V. Evolution of requirements to the material properties of permanent magnets for electrical machines. *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 99–108. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-trebovaniy-k-svoystvam-materialov-postoyannyh-magnitov-dlya-elektricheskikh-mashin> (date of access: 14.11.2023).

6. Valeev R.A., Piskorskiy V.P., Korolev D.V., Morgunov R.B. Optimization of the cobalt content as a way of temperature stabilization of rare earth magnets. // *Proceedings of VIAM*, 2023, No.3 (121). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-soderzhaniya-kobaltakak-sposob-temperaturnoy-stabilizatsii-redkozemelnyh-magnitov> (date of access: 16.11.2023).

7. Makarychev Yu.A., Ivannikov Yu.N., Brattsev Ya.A., Polyansky E.A. Combined magnetic bearing // *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2020, no. 4 (68). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kombinirovannyi-magnitnyy-podves> (date of access: 16.11.2023).

8. Lukin A.A. Features of the formation of a highly coercive state in PM of the rem-m type // *GIAB*, 2007, no.12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-vysokokoertsitivnogo-sostoyaniya-v-pm-tipa-rzm-m> (date of access: 16.11.2023).

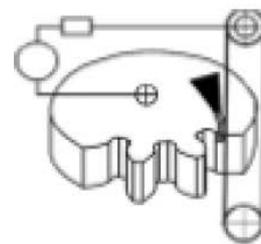
9. Cherednichenko I.V., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Kuzmina N.A., Shubakov V.S., Zhukov D.G. The structure and properties of permanent magnetic alloys UNDK25BA, manufacturing by directional solidification methods with liquid metal cooler // *Proceedings of VIAM*, 2017, no. 11 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-i-svoystva-splavov-dlya-postoyannyh-magnitov-yundk25ba-poluchennyh-metodom-napravlennoy-kristallizatsii-s> (date of access: 16.11.2023).

10. Cherednichenko I.V., Bavina M.A., Bondarenko Yu.A., Shurygin V.D., Ovchinnikov A.D., Galimullin S.A. Influence of directional crystallization parameters on the structure and properties of permanent magnets made of Yundkba alloy // *Proceedings of VIAM*. 2023. No. 11 (129). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-parametrov-napravlennoy-kristallizatsii-na-strukturu-i-svoystva-postoyannyh-magnitov>

Статья поступила в редакцию 28.12.2023; одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 12.01.2024.

The article was submitted 28.12.2023; approved after reviewing 09.01.2024; assepted for publication 12.01.2024.





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №2 (152). С.12-19.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №2 (152). P. 12-19.

Научная статья  
УДК 534-8;621.92  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-19

### Анализ возможностей оптимизации выбора ультразвукового оборудования для нанесения функциональных покрытий

Александр Андреевич Нечай<sup>1</sup>, магистрант  
Александр Вадимович Сухов<sup>2</sup>, аспирант  
Дмитрий Сергеевич Фатюхин<sup>3</sup>, д.т.н.

Софья Александровна Фомушкина<sup>4</sup>, студент

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный  
технический университет (МАДИ), Москва, Россия

<sup>1, 2</sup> [sukhov-aleksandr96@mail.ru](mailto:sukhov-aleksandr96@mail.ru) / <https://orcid.org/0009-0009-9097-8216>

<sup>3, 4</sup> [mitriy2@yandex.ru](mailto:mitriy2@yandex.ru) / <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

**Аннотация.** Для обеспечения требований, влияющих на качество функциональных покрытий, в настоящее время применяются различные технологии, одной из которых является применение ультразвука. Для формирования функциональных покрытий ультразвук применяется как на этапе подготовки поверхности, так и на этапе нанесения покрытия. Так, на этапе подготовки поверхности ультразвук позволяет проводить предварительную очистку поверхности, обеспечить необходимую шероховатость поверхности с помощью ультразвуковой прокатки, а также предварительно активировать поверхность перед азотированием за счет поверхностного пластического деформирования. В случае нанесения покрытий ультразвук позитивно влияет на азотирование и нанесение лакокрасочных покрытий. Однако используемое в рамках различных процессов подготовки и нанесения покрытий ультразвуковое оборудование серьезно различается по своим характеристикам. Так, применяемые ультразвуковые генераторы отличаются по мощности, удельной материалоемкости, рабочей частоте, а также конструктивными особенностями, обеспечивающим стабильную работу, например, автоматическую подстройку частоты. Используемые преобразователи отличаются друг от друга достигаемыми амплитудами, мощностью и рабочей частотой. В связи с этим целью работы является разработка рекомендаций по использованию ультразвукового оборудования в различных технологических процессах создания функциональных покрытий. В работе проанализировано ультразвуковое оборудование, применяющееся в технологиях по подготовке поверхности и нанесению функциональных покрытий. Определены главные технологические параметры, определяющие выбор оборудования. Приведены рекомендации по использованию ультразвукового оборудования при создании различных функциональных покрытий, в рамках которых определена связка преобразователь-генератор, способная обеспечить предъявляемые требования к большинству процессов подготовки поверхности и нанесения покрытия.

**Ключевые слова:** ультразвук, колебательная система, ультразвуковой генератор, функциональное покрытие, азотирование, лакокрасочное покрытие

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: «Разработка гибридных ультразвуковых технологий получения функциональных покрытий» № 21-19-00660.

**Для цитирования:** Нечай А.А., Сухов А.В., Фатюхин Д.С., Фомушкина С.А. Анализ возможностей оптимизации выбора ультразвукового оборудования для нанесения функциональных покрытий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 2 (152). С. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-19

## Exploratory study for optimization of the choice of ultrasonic equipment for the deposition of functional coatings

Alexander A. Nechai<sup>1</sup>, magistant  
Alexander V. Sukhov<sup>2</sup>, PhD student  
Dmitry S. Fatyukhin<sup>3</sup>, D. Eng.  
Sofya A. Fomushkina<sup>4</sup>, student  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia  
<sup>1, 2</sup> sukhov-aleksandr96@mail.ru  
<sup>3, 4</sup> mitriy2@yandex.ru

**Abstract.** To meet the requirements affecting the quality of functional coatings, various technologies are currently being used, one of which is the use of ultrasonics. To form functional coatings, ultrasonics are used both at the stage of surface preparation and at the stage of coating deposition. Thus, at the stage of surface preparation, ultrasonics allow making surface preclean, ensuring the necessary surface roughness due to ultrasonic rolling, as well as preactivation of the surface before nitriding due to surface plastic deformation. In case of coating deposition, ultrasonics contribute to better nitriding and painting. However, ultrasonic equipment used in various preparation and coating deposition processes differs significantly in its characteristics. Thus, the ultrasonic generators vary in alternator capacity, specific material consumption, actual frequency, as well as design features that ensure stable operation, for example, automatic frequency control. The converters differ from each other in accomplishable amplitudes, power and actual frequency. In this regard, the aim of the work is to develop recommendations on the use of ultrasonic equipment in various technical processes for the creation of functional coatings. The paper studies ultrasonic equipment used in surface preparation and functional coating application process. The main process-dependent parameters aimed at choosing the required equipment have been characterized. Recommendations are given on the use of ultrasonic equipment for various functional coatings generation, when a converter-generator couple is found and it meets the requirements for most surface preparation and coating deposition processes.

**Keywords:** ultrasonics, oscillatory system, ultrasonic generator, functional coating, nitriding, painting system

**Acknowledgements:** the work was carried out with the support of a grant from the Russian Scientific Foundation in the priority area of activity of the Russian Scientific Foundation «Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups» of the scientific project: «Development of hybrid ultrasonic technologies for functional coatings generation» No. 21-19-00660.

**For citation:** Nechai A.A., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S., Fomushkina S.A. Exploratory study for optimization of the choice of ultrasonic equipment for the deposition of functional coatings / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 2 (152). P. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-19

### Введение

Обеспечение качества функциональных покрытий, применяемых в машиностроении, в настоящее время является приоритетной задачей развития промышленности, что обуславливается внешними вызовами и активно проводимым импортозамещением. Для выполнения требований, влияющих на качество, активно разрабатываются различные методы нанесения покрытий, интенсифицировать которые можно за счет применение ультразвуковых колебаний.

Ультразвуковые колебания показали свою эффективность в различных процессах, как подготовки поверхности перед

нанесением функциональных покрытий, так и непосредственно в процессе нанесения покрытия.

На этапе подготовки поверхности ультразвук успешно применяется в таких процессах, как:

- предварительная очистка обрабатываемой поверхности перед нанесением покрытия;
- создание необходимой величины шероховатости поверхности методом ультразвуковой прокатки;
- предварительная активация поверхности перед процессом азотирования за счет

предварительного поверхностного пластического деформирования (ППД).

Ультразвук показал свою эффективность при очистке различных поверхностей, как простой, так и сложной формы, за счет использования кавитации и акустических потоков. Применение ультразвука позволяет многократно интенсифицировать процессы, происходящие в жидкости при очистке. Помимо повышения качества очистки ультразвук положительно влияет на поверхность при ППД. В этом случае за счет ультразвука при меньшем усилии прижима достигается требуемая шероховатость. Кроме того, ультразвук позволяет повысить глубину азотированного слоя за счет ППД перед азотированием в промежутке между операциями закалки и отпуска [1].

Также ультразвук эффективно влияет на процессы нанесения функциональных покрытий, такие как азотирование и нанесение лакокрасочных материалов (ЛКМ).

Однако при всех достоинствах ультразвука номенклатура используемых в данный момент колебательных систем и генераторов очень широка, что обуславливает сложности разработки новых технологий применения ультразвуковых колебаний на различных этапах создания функциональных покрытий. В связи с этим целью работы является разработка рекомендаций по использованию ультразвукового оборудования в различных технологических процессах создания функциональных покрытий.

#### Анализ оборудования и требований к нему

Применение ультразвука при кристаллизации, очистке, воздействии на поверхность металла, распылении, воздействии на жидкость требует увеличения мощности при высокой эффективности и долговечности аппаратуры [2]. Также важным требованием является обеспечение стабильности режимов ультразвуковой обработки.

Исследование эффективности работы ультразвуковых установок показало, что выпускаемое серийное оборудование не

удовлетворяет современным требованиям. Например, для генератора УЗГ 3-4 отношение массы к мощности составляет порядка 150 кг/кВт. Анализ энергетических аспектов введения ультразвуковых колебаний в нагрузку позволяет сформулировать технические требования к ультразвуковому оборудованию, предназначенному для использования в технологических процессах, связанных с нанесением функциональных покрытий:

– воздействия на поверхность твердого металла при температурах от комнатной до 600 °С (упрочнение поверхностного слоя и выглаживание поверхности);

– ультразвуковой очистки наружных поверхностей и поверхностей внутренних полостей изделий машиностроения;

– ультразвукового распыления вязких жидкостей.

Воздействие на поверхность твердого металла для выглаживания не требуется использования ультразвуковых установок большой мощности. В таком случае система может быть построена на базе генератора мощностью до 1,0 кВт, однако амплитуда колебательных смещений инструмента должна быть не менее 15...20 мкм.

Для очистки наружных поверхностей большинства деталей сложной формы и обработки внутренних поверхностей необходимо применение излучателей стержневого типа, позволяющих реализовать в жидкости удельную акустическую мощность более 12 Вт/см<sup>2</sup>. Для этого используются генераторы мощностью, не превышающей 3,0...4,0 кВт, обладающие высоким КПД (не менее 90 %) и удельной материалоемкостью генератора не более 10 кг/ кВт.

Существует большое количество ультразвуковых генераторов, позволяющих проводить ультразвуковые операции при широком спектре параметров. Доступные в Российской Федерации ультразвуковые генераторы имеют различные мощность, рабочие частоты и конструктивные особенности, примеры используемых генераторов с основными характеристиками представлены в табл. 1.

## 1. Примеры ультразвуковых генераторов и их основные характеристики

### 1. Examples of ultrasonic generators and their main characteristics

Наименование	Тип используемых преобразователей	Конструктивные особенности	Мощность, кВт	Рабочая частота, кГц
УЗГ13-0,1/22	Магнитострикционный	АПЧ, АСА, ИА, ПРМ	0,1	18; 22
УЗГ-2-22	Магнитострикционный	АПЧ, АСА, ПРМ	2,0	18...44
Ультразвуковой генератор И10	Магнитострикционный, пьезокерамический	АПЧ, ПРМ или СРМ, ВПО	1,5	16...25
УЗГ17-2,0/22	Пьезокерамический	АПЧ, ИА, СРМ, ВПО	2,0	18; 22
УЗГ5-4,0/22	Магнитострикционный	ПРМ, ВПО	4,0	16; 18; 22
УЗГ15-0,1/22	Пьезокерамический	АПЧ, СРМ	0,1	18; 22

*Примечания:* АПЧ – автоматическая подстройка частоты; АСА – автоматическая стабилизация амплитуды; ВПО – воздушное принудительное охлаждение; ИА – индикатор амплитуды; ПРМ – плавная регулировка мощности; СРМ – ступенчатая регулировка мощности.

Наиболее распространенными являются генераторы УЗГ5-4,0/22, УЗГ17-2,0/22, УЗГ-2-22. Они предназначены для питания магнитострикционных преобразователей ультразвуковых колебательных систем различного технологического назначения. Эти генераторы отличаются удельной материалоемкостью, которая составляет 13,12; 11,25 и 3,5 кг/кВт соответственно

Наиболее сбалансированным можно отметить УЗГ-2-22, внешний вид которого представлен на рис. 1. Генератор позволяет в широком частотном диапазоне решать исследовательские задачи, измерять амплитуду, ток, частоту, потребляемую мощность и другие параметры, снижать и исследовать амплитудно-частотные характеристики. Имея массу в 7,0 кг, данный генератор развивает мощность в 2,0 кВт, за счет чего превосходит генераторы УЗГ5-4,0/22 и УЗГ17-2,0/22 в удельной материалоемкости.



Рис. 1. Ультразвуковой генератор УЗГ-2-22

Fig. 1. Ultrasonic generator UZG-2-22

Помимо генераторов существует множество различных ультразвуковых преобразователей, как магнитострикционных (ПМС), так и пьезокерамических (ПП). Примеры используемых преобразователей с основными характеристиками представлены в табл. 2.

2. Примеры ультразвуковых преобразователей и их основные характеристики

2. Examples of ultrasonic converters and their main characteristics

Наименование	Назначение	Амплитуда, мкм	Мощность, кВт	Рабочая частота, кГц
ПМС1-0,63/22	Сварка пластмасс и металлов; размерная обработка твёрдых и хрупких материалов; озвучивание жидких сред; полировка	20	0,4	22
ПМС1-1,0/22	Сварка пластмасс и металлов; размерная обработка твёрдых и хрупких материалов; озвучивание жидких сред; полировка	10	1,0	22
ПМС-2,5/18	Озвучивание жидких сред	5	2,5	18
ПП1-0,63/35	Озвучивание жидких сред	2	0,63	35
ПП1-0,1/22	Сварка термопластичных материалов, металлов; размерная обработка твердых и хрупких материалов; озвучивание жидких сред; очистка; резание; впрессовка; полировка; гравировка	10	0.1	22
ПП1-0,063/22	Озвучивание жидких сред, диспергирование, эмульгирование, гомогенизация, очистка и т.п	70	0.063	22

В качестве электроакустического преобразователя для работы в непрерывном режиме, которым является режим работы при технологических процессах, связанных с нанесением функциональных покрытий, наиболее рационально использовать магнито-стрикционные преобразователи с мощностью до 3,0 кВт.

Наиболее универсальным магнито-стрикционным преобразователем является ПМС1-1,0/22, внешний вид которой представлен на рис. 2. Данный ПМС является универсальным за счет оптимального соотношения мощность/амплитуда, что позволяет использовать ее в различных процессах обработки.



Рис. 2. Колебательная система ПМС1-1,0/22

Fig. 2. Oscillatory system PMS 1-1.0/22

Данный преобразователь применяется для широкого спектра процессов – сварки, размерной и жидкой обработки и т. п. Магнито-стрикционный эффект обеспечивает пакет пластин из пермендюра 49К2Ф. Однако для работы ПМС1-1,0/22, как и любого магнито-стрикционного преобразователя, необходимо охлаждение, что накладывает определенные ограничения на условия эксплуатации.

Подбор оборудования для конкретной технологии зачастую зависит от параметров процесса или материала, которые необходимо обеспечить.

Например, для нанесения лакокрасочного покрытия могут использоваться как магнито-стрикционные [3], так и пьезо-керамические колебательные системы [4].

Экспериментальное исследование по влиянию ультразвука на процессы подготовки и распыления ЛКМ, проводимое с помощью магнито-стрикционной колебательной системы представлено в работе [3]. Описываемая колебательная система (КС) является аналогом

ПМС1-1,0/22 и позволяет достигать амплитуд в 10 мкм, которые, в свою очередь, можно увеличить до 70 мкм с помощью рабочего инструмента различных конструкций. При подготовке ЛКМ достигаются амплитуды до 20 мкм, большие значения не рассматриваются по причине сильного нагрева ЛКМ, что снижает его характеристики.

В работе [4] описана конструкция инструмента для пневмоультразвукового распыления, где в качестве электроакустического преобразователя выступают пьезоэлектрические пластины. В самой работе марка пластин не указана, однако результаты применения данной конструкции показывают высокую эффективность ее применения, что позволяет говорить о целесообразности использования пьезокерамики для распыления с помощью ультразвука.

В работе [5] описано ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (УППД), которое проводится перед азотированием. УППД проводилось на токарном станке ультразвуковым комплектом, состоящим из генератора УЗГ 02/22 и магнитострикционного преобразователя ПМС-063. Обработка осуществлялась сферическим индентором с радиусом закругления 5,0 мм на следующих режимах: мощность генератора 200 Вт; амплитуда колебания индентора 10 мкм; усилие прижима индентора 75 Н [5].

В работе [6] представлен расчет электрических параметров пакета УКС. Максимально допустимая электрическая мощность возбуждения разрабатываемого пакета УКС составила 3,9 кВт; величина тока подмагничивания – 7,26 А; эффективное значение полного тока – 8,12 А; амплитуда напряжения возбуждения – 744,4 В; амплитуды колебательных смещений на выходе с магнитострикционного преобразователя – 4,27 мкм; амплитуда колебательных смещений на конце волновода – 8,71 мкм. Для разработанной УКС с целью интенсификации газового азотирования выбран ультразвуковой генератор УЗГ-2-22, т. к. его технические характеристики отвечают необходимым условиям при решении поставленных задач. Авторами предполагается, что указанная связка «ультразвуковой генератор-колебательная система» позволяет за счет достигаемых

параметров мощности и амплитуды достичь высоких результатов.

В работе [7] рассмотрены особенности переноса микрочастиц на поверхности LiNbO<sub>3</sub> при возбуждении в пластине различных мод и взаимодействие пьезоэлектрического поля с микрочастицами с соответствующим влиянием на процесс их переноса вдоль поверхности LiNbO<sub>3</sub>. В эксперименте использовалась пластина ниобата лития толщиной среза 630 мкм. Для возбуждения УЗ-волн она размещалась на заземленном металлическом основании. На верхнюю грань пластины LiNbO<sub>3</sub> наносился медный электрод шириной 1,0 мм. Приложение высокочастотного электрического напряжения  $V$  между электродами приводило к возбуждению в пластине УЗ-волн Лэмба. Исследования проводились на двух частотах,  $f_1 = 3,7$  МГц и  $f_2 = 5,2$  МГц. Результаты показали эффективность метода для переноса микрочастиц.

### Подбор универсального оборудования

Анализ источников показывает, что в различных технологических процессах создания функциональных покрытий используются различные комплекты ультразвукового оборудования, которые серьезно отличаются друг от друга [1, 5, 8].

Также анализ показывает, что основными параметрами обработки, как правило, указывается амплитуда колебаний, частота колебаний и мощность.

Главным параметром обработки в технологических процессах создания функциональных покрытий в работах [9, 10] является амплитуда колебаний. Ее оптимальное значение варьируется от 2,0...3,0 мкм до 25 мкм в зависимости от процесса. Однако значения амплитуды свыше 25 мкм не рассматриваются ввиду отсутствия такой необходимости. В связи с этим к ультразвуковому оборудованию предъявляется требование по обеспечению амплитуды в широком диапазоне от 2,0 до 25 мкм. Амплитуда колебаний определяется конструкцией колебательной системы и рабочего инструмента.

Два других фактора влияют на технологические процессы меньше, чем амплитуда. Частота колебаний может влиять на процесс,

но она ограничивается применяемым оборудованием, поскольку каждая КС работает на своей резонансной частоте. Анализ существующего ультразвукового оборудования показал, что наиболее распространенной является резонансная частота 22 кГц. Это обуславливается наибольшей эффективностью колебательных систем, работающих на этой частоте одновременно с соответствием требованиям, предъявляемым к ультразвуковым установкам для работы в промышленности. Требуемая величина мощности обуславливается необходимостью передавать через колебательную систему необходимое количество энергии в технологическую среду. Для рассматриваемых технологических процессов мощность более 3,0...4,0 кВт является избыточной.

Учитывая вышеизложенное, в качестве рационального комплекта ультразвукового оборудования предлагается использовать УЗГ-2-22 и ПМС1-1.0/22. Такая комбинация позволяет эффективно провести операции предварительной подготовки поверхности перед нанесением функциональных покрытий, а также непосредственно наносить покрытие.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Перевалова О.Б., Панин А.В., Синякова Е.А.** Особенности поверхностного упрочнения 12Cr ферритно-мартенситной стали при совмещении ионно-плазменного азотирования и ультразвуковой обработки // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 3. С. 43–50.
2. **Технологическое** применение ультразвука в транспортном машиностроении / О.В. Абрамов, В.О. Абрамов, В.В. Артемьев, и др. М.: Издательство «Техполиграфцентр», 2007. 112 с.
3. **Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С.** Применение ультразвуковых технологий для подготовки лакокрасочного материала к нанесению // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2014. № 2 (37). С. 36–43. EDN SDMOWZ.
4. **Сундуков С.К., Чендаров А.С., Фатюхин Д.С.** Ультразвуковая технология получения лакокрасочных покрытий // Юность и знания – гарантия успеха: Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, Курск, 17–18 декабря 2014 г. / Ответственный редактор: Разумов М.С. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2014. С. 402–407. EDN TGAHRZ.
5. **Ковалевская Ж.Г., Уваркин П.В., Толмачев А.И.** Исследование влияния дефектов точения на формирование микрорельефа поверхности стали при ультразвуковой финишной обработке // Обработка металлов

(технология, оборудование, инструменты). 2012. № 1 (54). С. 14–18. EDN OXWXTD.

6. **Перекрестова В.А., Сухов А.В., Левушкина Н.В., Нигметзянов Р.И.** Расчет основных показателей ультразвуковой колебательной системы для интенсификации процессов газового азотирования // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 10 (124). С. 11–17. DOI 10.30987/2223-4608-2021-10-11-17. EDN HFLLYD.

7. **Горб А.Н., Коротченков О.А.** Стимулированный ультразвуком перенос микрочастиц на поверхности пластины LiNbO<sub>3</sub> // Письма в Журнал технической физики. 2002. Т. 28. № 17. С. 67–73. EDN RYRABP.

8. **Чудина О.В., Симонов Д.С., Симонова Т.С., Литовченко А.Н.** Повышение эффективности поверхностного упрочнения конструкционных сталей закалкой ТВЧ и ультразвуковой обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 9 (225). С. 427–431. DOI 10.36652/1813-1336-2023-19-9-427-431. EDN APAVCM.

9. **Чудина О.В., Приходько В.М., Симонов Д.С.** К вопросу разработки высокоэффективных комбинированных процессов поверхностного упрочнения деталей транспортного машиностроения // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли: сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей, Брянск, 05–07 октября 2022 года. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2022. С. 178–183. EDN NCHRLN.

10. **Приходько В.М., Симонов Д.С.** Ультразвук в гибридных технологиях производственных процессов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3 (77). С. 191–196. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.037. EDN FVTQCP.

## REFERENCES

1. **Perevalova O.B., Panin A.V., Sinyakova E.A.** Features of surface hardening of 12Cr ferritic-martensitic steel when combining ion-plasma nitriding and ultrasonic treatment // Physics and chemistry of materials processing, 2012, no. 3, pp. 43–50
2. **Technological application of ultrasound in transport engineering / O.V. Abramov, V.O. Abramov, V.V. Artemyev, et al.** Moscow.: Publishing house «Techpoligrafcenter», 2007, 112 p.
3. **Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S.** Application of ultrasonic technologies for the preparation of paintwork material for its application // Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), 2014, no. 2 (37), pp. 36–43, EDN SDMOWZ.
4. **Sundukov S.K., Chendarov A.S., Fatyukhin D.S.** Ultrasonic technology for obtaining paint materials // Youth and knowledge are a guarantee of success: proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Kursk, December 17-18, 2014 / Executive editor: Razumov M.S. Kursk: CJSC «University Book», 2014. pp. 402–407. EDN TGAHRZ.
5. **Kovalevskaya Zh.G., Uvarkin P.V., Tolmachev A.I.** Investigation of the influence of turning defects on the

formation of the surface microrelief of steel at ultrasonic finishing treatment // Metalworking (technology, equipment, tools), 2012, no. 1 (54), pp. 14–18. EDN OXWXTD.

6. Perekrestova V.A., Sukhov A.V., Levushkina N.V., Nigmatzyanov R.I. Calculation of the main parameters of the ultrasonic oscillatory system for the intensification of gas nitriding processes // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 10 (124), pp. 11–17. DOI 10.30987/2223-4608-2021-10-11-17. EDN HFLLYD.

7. Gorb A.N., Korotchenkov O.A. Ultrasound-stimulated translation of microparticles on the surface of a LiNbO<sub>3</sub> plate // Technical Physics Letters, 2002, vol. 28, no. 17, pp. 67–73. EDN RYRABP.

8. Chudina O.V., Simonov D.S., Simonova T.S., Litvchenko A.N. Increasing in efficiency of surface hardening of structural steels by HFC hardening and ultrasonic treatment // Hardening technologies and coatings, 2023, vol. 19, no. 9 (225), pp. 427–431. DOI 10.36652/1813-1336-2023-19-9-427-431. EDN APAVCM.

9. Chudina O.V., Prikhodko V.M., Simonov D.S. On the issue of the development of highly effective combined processes for surface hardening of transport engineering parts // Technological support and quality improvement of engineering and aerospace industries: proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Bryansk Scientific School of Engineering Technologists, Bryansk, 05-07 October 2022. Bryansk: Bryansk State Technical University, 2022, pp. 178–183. EDN NCHRLN.

10. Prikhodko V.M., Simonov D.S. Ultrasound in hybrid technologies of production processes // Transactions of the Crimean Engineering and Pedagogical University, 2022, no. 3 (77), pp. 191–196. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.037. EDN FVTQCP.

**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 06.12.2023; одобрена после рецензирования 14.12.2023; принята к публикации 18.12.2023.

The article was submitted 06.12.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 18.12.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №2 (152). С.20-27.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №2 (152). P. 20-27.

Научная статья  
УДК 621.785.5  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-20-31

## Технология и результаты изучения взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц низкотемпературной плазмы

Борис Максович Бржозовский<sup>1</sup>, д.т.н.

Елена Петровна Зинина<sup>2</sup>, д.т.н.

Владимир Васильевич Мартынов<sup>3</sup>, д.т.н.

<sup>1, 2, 3</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН  
(ИМАШ РАН), Москва, Россия

<sup>1</sup> bmbasar85@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> e-zinina@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>3</sup> v-martynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4177-0963>

**Аннотация.** Представлен анализ подходов к изучению взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц с целью повышения эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации поверхностного слоя. Результаты анализа показали, что изучать взаимодействие теоретически достаточно сложно, поэтому представляет интерес его экспериментальное изучение с использованием методов электрохимии, позволяющих исследовать явления смачивания и растекания помещенной на поверхность жидкости, которые вызваны процессами молекулярного взаимодействия. Разработана технология изучения процесса взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц низкотемпературной плазмы. В основу технологии положено взаимодействие поверхности с имитатором потока частиц, в качестве которого использован водный 3,0 %-ный раствор соли NaCl. В ходе изучения установлено, во-первых, что на результаты взаимодействия активное влияние оказывают химические процессы между поверхностью и ионами раствора, зависящие от значения подаваемого на поверхность потенциала электростатического поля, а также ее микрорельеф, во-вторых, что основным пограничным процессом, протекающим при взаимодействии поверхности с раствором, является процесс адсорбции. Представлены данные анализа последствий воздействия на поверхность плазмы, подтвердившие достоверность результатов изучения, поскольку протекание химических процессов и процессов адсорбции здесь также имеет место. В целом представленные в статье материалы позволили сделать вывод о том, что разработанная технология делает возможным определение условий, обеспечивающих повышение эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации в направлении улучшения показателей как поверхностных (электрохимических), так и объемных (физико-механических и электрофизических) свойств, если использовать ее как в исходном состоянии, поверхности, так и в состоянии, измененном под воздействием частиц плазмы.

**Ключевые слова:** поверхность, низкотемпературная плазма, заряженные частицы, взаимодействие, имитация, технология

**Благодарности:** материал подготовлен в рамках выполнения научного исследования по гранту Российского научного фонда №19-19-00101.

**Для цитирования:** Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Технология и результаты изучения процесса взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц низкотемпературной плазмы // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 2 (152). С. 20–27. doi: 10.30987/2223-4608-2024-20-27

## Technology and results of studying the surface interaction for charged particles flow in low-temperature plasma

Boris M. Brzhozovsky<sup>1</sup>, D. Eng.

Elena P. Zinina<sup>2</sup>, D. Eng.

Vladimir V. Martynov<sup>3</sup>, D. Eng.

<sup>1, 2, 3</sup> A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences  
(IMASH RAS), Moscow, Russia

<sup>1</sup> bmbars85@yandex.ru

<sup>2</sup> e-zinina@bk.ru

<sup>3</sup> v-martynov@mail.ru

**Abstract.** An analysis of approaches to studying the interaction of the surface with a stream of charged particles is presented in order to increase the efficiency of the process of low-temperature plasma modification of the surface layer. The results of the analysis showed that it is theoretically difficult to study the interaction, therefore, it is interesting to study it empirically using electrochemistry methods that allow us to investigate the phenomena of mixing and spreading of a liquid placed on the surface caused by molecular interaction processes. An off-the-shelf technology for studying surface interaction for charged particles flow in a low-temperature plasma has been found. The technology is based on the surface interaction for a particle flow simulator, using an aqueous 3,0 % NaCl salt solution. During the course of studying, it was found, firstly, that the results of interaction are actively influenced by chemical processes between the surface and the ions of the solution, depending on the value of the potential of the electric field applied to the surface, as well as due to its microrelief, and secondly, that the main boundary process running under surface interaction and solution is adsorption. The data of the analysis of the effects of exposure to the plasma surface are presented. They proved the reliability of study results, since the course of chemical and adsorption processes also take place. In general, the materials presented in the article allowed making conclusion that the developed technology makes it possible to determine the conditions that ensure an increase in the efficiency of the low-temperature plasma modification process contributing to the improvement of both surface (electrochemical) and volumetric (physical mechanical and electrophysical) properties if it is used either in the initial state or in the state changed by plasma particles.

**Keywords:** surface, low-temperature plasma, charged particles, interaction, simulation, technology

**Acknowledgements:** the material was prepared as part of the scientific research under the grant of the Russian Science Foundation No. 19-19-00101

**For citation:** Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. Technology and results of studying the surface interaction for charged particles flow in low-temperature plasma / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 2 (152). P. 20–27. doi: 10.30987/2223-4608-2024-20-27

В числе проблем, имеющих прямое отношение к повышению эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации поверхностного слоя металлических изделий [1], относится и взаимодействие модифицируемой поверхности с потоком заряженных частиц плазмы. Анализ публикаций, посвященных изучению структуры и свойств поверхности твердого тела, а также ее взаимодействия с заряженными частицами [2 – 8], показал следующее:

– с позиций квантовой механики и материаловедения поверхностный слой рассматривается как дефектный не скомпенсированный слой. Это обусловлено тем, что между частицами твердого тела (атомами, молекулами, ионами) действуют силы притяжения и отталкивания. Под действием этих сил внутри

твердого тела частица удерживается силами связи со стороны окружающих частиц в том положении, в котором равнодействующая сил равна нулю. В поверхностном слое эти связи не скомпенсированы, и его структура вследствие асимметрии действия межатомных и межмолекулярных сил оказывается искаженной;

– объем металлического твердого тела представляется как двухкомпонентная система, состоящая из ионного остова и «электронного газа» коллективизированных электронов. Электроны в металлах подчиняются статистике Ферми-Дирака, а состояние электронного газа при обычных температурах является сильно вырожденным. Это означает, что электроны заполняют практически полностью все энергетические уровни от нулевого до самого верхнего, носящего название энергии

Ферми, которая является чрезвычайно большой – единицы и десятки электрон-вольт. Из-за большой величины этой энергии основной вклад в энергетические характеристики металлов вносят именно электроны. Электронами же определяются и поверхностные свойства металлов;

– распределение электронной плотности на поверхности металла не имеет резкой границы со стороны вакуума. Электроны «выходят» в область вакуума, формируя двойной электрический слой на поверхности;

– пространственный заряд вблизи металлической поверхности формируется за счет тепловой эмиссии электронов с поверхности, которые не «падают» на нее вследствие их теплового движения. Это облако экранирует поле поверхности металла, вместе с которым оно образует двойной электрический слой. В равновесии имеется равенство потоков электронов из металла в вакуум и из электронного облака на поверхность металла;

– внешнее электростатическое поле вызывает возмущение поверхностного заряда. В случае направления от поверхности даже бесконечно малое поле «вырывает» электроны из металла, а при направлении к поверхности оно деформирует распределение электронной плотности, сдвигает его границу к металлу и «вталкивает» электроны в пределы положительного фона остова металла. При больших полях влиянием внешнего экранирования можно пренебречь, поскольку поле деформирует поверхностный барьер настолько, что оно прокладывает себе «дорогу» к металлу.

Изложенное означает, что поверхность металла обладает индивидуальными свойствами и в различных условиях способна по-разному проявлять их. В случае низкотемпературной плазменной модификации свойства проявляются при взаимодействиях полей, создаваемых зарядом частиц в пристеночном слое плазмы, и зарядом поверхности, созданным подачей положительного потенциала смещения при участии электрической составляющей сверхвысокочастотной электромагнитной волны. Изучать взаимодействие частиц с поверхностью во всех его аспектах и проявлениях теоретически (например, с позиций квантовой механики в рамках метода функционалов плотности) в этих условиях достаточно сложно,

поэтому представляет интерес его экспериментальное изучение методами электрохимии, исследуя явления смачивания и растекания помещенной на поверхность жидкости, вызванные процессами молекулярного взаимодействия. При этом необходимо принять во внимание следующее [9 – 13]:

1. Молекулярные теории смачивания развиты для систем, в которых адгезия обусловлена преимущественно силами дисперсионного взаимодействия.

2. При смачивании с момента образования поверхности контакта твердой и жидкой фаз протекают процессы молекулярного взаимодействия, которые выравнивают химические потенциалы (растворение твердого материала в жидкости, диффузия вещества жидкости в подложку, структурные превращения, химические реакции и т. д.).

Интенсивность молекулярных взаимодействий можно охарактеризовать их полярностью. Макроскопической мерой полярности жидкостей с низким поверхностным натяжением (вода, органические вещества и т. п.) может служить, например, дипольный момент, диэлектрическая проницаемость. Из этого следует, что чем больше отличаются два вещества друг от друга по своей полярности, тем больше поверхностное натяжение на границе между ними и тем хуже смачивание в этой системе.

При контакте веществ с близкой полярностью (межфазное натяжение сравнительно невелико) достигается хорошее смачивание. Из этого вытекает признак уравнивания полярных фаз: вещество *C* может адсорбироваться на поверхности раздела фаз *A* и *B*, если присутствие вещества *C* в поверхностном слое уравнивает (уменьшает) разность полярностей на межфазной границе, т.е. твердое тело лучше смачивается той жидкостью, по отношению к которой разность полярностей оказывается наименьшей (признак уравнивания полярностей). В соответствии с этим признаком смачивание может иметь место при контакте твердой и жидкой фаз со сходным (подобным) типом межатомных взаимодействий (признак подобия природы жидкости и твердого тела: «подобное смачивает подобное»).

3. В неравновесных системах поверхностное натяжение на границе двух фаз не остается постоянным, а изменяется в зависимости от времени контакта и может сильно зависеть от интенсивности процессов химического и физико-химического взаимодействия.

4. При контакте капля воды и различных полярных органических жидкостей со стеклом и сталью силы молекулярного притяжения, действующие со стороны твердого тела на жидкость, вытягивают из нижней части капли тонкий слой жидкости. Вблизи линии смачивания происходят два противоположно направленных процесса переноса молекул жидкости по твердой поверхности. Прямой поток переносит молекулы жидкой фазы на поверхность раздела твердое тело – окружающая среда; здесь они адсорбируются на активных центрах твердой поверхности. Обратный поток состоит из десорбированных молекул, возвращаемых обратно в жидкую фазу. Интенсивность каждого потока определяется энергией активации соответствующего процесса, а средняя скорость перемещения линии смачивания  $v$  определяется разностью прямого и обратного потоков. Скорость растекания зависит от соотношения движущих сил и сил сопротивления.

5. Растекание происходит в том случае, если работа адгезии превышает работу когезии растекающейся жидкости, т. е. если в результате адсорбции атомов или ионов на поверхности раздела «жидкость – твердое тело» разрушаются ее межмолекулярные связи.

6. Химический состав и плотность упаковки молекул твердого тела влияют на смачивание. Это связано с тем, что число связей, образующихся между молекулами твердого тела и молекулами жидкости, зависит от числа молекул твердого тела на единицу площади. Поэтому можно ожидать, что с возрастанием плотности упаковки смачивание должно улучшаться, по крайней мере, при контакте фаз, сходных по природе связей между молекулами. Улучшение смачивания объясняется тем, что более «рыхлая» структура монослоя облегчает диффузионное проникновение молекул жидкой фазы, что в свою очередь способствует снижению межфазного поверхностного натяжения.

7. Растекание зависит:

– от размера и массы капли. Для капли одной и той же массы скорость растекания резко уменьшается с увеличением радиуса площади контакта. Химическое взаимодействие контактирующих партнеров снижает скорость растекания, что особенно заметно при относительно небольших радиусах контакта;

– от коэффициента шероховатости. На более шероховатой поверхности средняя скорость растекания будет больше, чем на гладкой поверхности. Под действием капиллярных сил течение жидкости по канавкам происходит значительно быстрее, чем при растекании по гладкой поверхности;

– от наличия на твердой поверхности участков с различными поверхностными свойствами (с малой степенью симметрии кристаллической решетки, различной ориентировкой кристаллических граней), когда анизотропия свойств кристалла проявляется особенно резко. Неоднородности структуры присущи поверхностям всех поликристаллов, композитных материалов, многофазных сплавов, пористых тел;

– от поляризации поверхности электрода на границе с раствором электролита (электрокапиллярный эффект). В большинстве систем максимум краевого угла достигается вблизи потенциала нулевого заряда металла – подложки. Максимальной движущей силой будет соответствовать минимум электрокапиллярной кривой твердого тела  $\sigma_{жт} = f(\varphi)$ . При существенном сдвиге потенциала жидкого металла относительно потенциала нулевого заряда  $\varphi_0$  (в одном и том же электролите) можно значительно ускорить растекание жидкого металла по поверхности диэлектрика. Сдвиг потенциала  $\varphi - \varphi_0$  целесообразен лишь до определенного предела, при котором в данной системе начинаются различные побочные процессы: анодное растворение жидкого металла при анодной поляризации, восстановление катиона электролита при катодной поляризации. В неравновесных системах, в которых смачивание носит химический (необратимый) характер, поляризация может влиять на смачивание более сложным образом.

С позиций представленных материалов была разработана технология изучения взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц низкотемпературной плазмы. В основу технологии положено взаимодействие

поверхности с имитатором потока частиц, в качестве которого использован водный 3,0 % раствор соли NaCl, поскольку он содержит положительные катионы  $\text{Na}^+$  и отрицательные анионы  $\text{Cl}^-$ , которые являются аналогами ионов и электронов плазмы. Это дало возможность, во-первых, исключить из наблюдения влияние поля электрической составляющей сверхвысокочастотной электромагнитной волны, участвующего в формировании плазмы, во-вторых, нанося раствор в виде капель на поверхность и подавая на нее положительный потенциал, наблюдать за поведением капель, в-третьих, анализировать и оценивать его количественно.

В ходе выполнения работ по изучению взаимодействия на пластину из стали 20, имеющую участки с различным микрорельефом и химическим составом, были помещены 14 капель различного размера (рис. 1). После этого на пластину от источника постоянного тока последовательно подавался положительный потенциал в диапазоне 0...180 В с шагом 20 В и производилась видеосъемка реакции на него капель в течение фиксированного интервала времени. Обработка видеозаписей заключалась в измерении размеров каждой капли до начала и после окончания воздействия потенциала, а также при его изменении, вычислении площадей капель и скоростей их изменения.

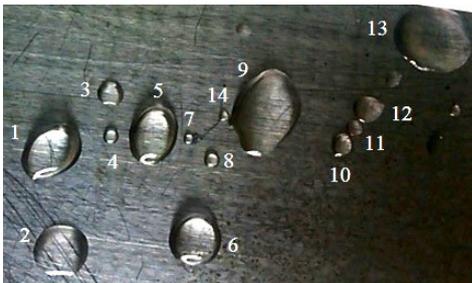


Рис. 1. Поверхность и схема расположения капель раствора NaCl в имитационном эксперименте

Fig.1. Surface and arrangement of NaCl solution droplets in a simulation experiment

Результаты обработки, представленные на рис. 2 – 4, а также их анализ (в том числе сравнительный с поведением плазмы) показали следующее:

– при отсутствии электростатического поля растекание капель в течение 180 с не наблюдалось;

– в максимальной степени на подачу потенциала отреагировали капли, имеющие наибольшие размеры, что представлено на рис. 2 (номера позиций графиков соответствуют номерам капель);



Рис. 2. Зависимости площадей капель от потенциала смещения

Fig. 2. Dependences of droplet areas on the displacement potential

– снижение скорости растекания капель при возрастании значения потенциала вызвано активным протеканием химического взаимодействия между поверхностью образца и ионами раствора NaCl. Об этом свидетельствуют следы коррозии, обнаруженные после окончания эксперимента. Наиболее интенсивно следы проявились у границ капель в областях, где в наибольшей степени действовали силы молекулярного притяжения со стороны твердого тела;

– на моменты изменения значений потенциала (рис. 3) от 0 В (белые столбики) до 180 В (черные столбики) реагировали не только крупные капли, но и капли, имевшие средние размеры;

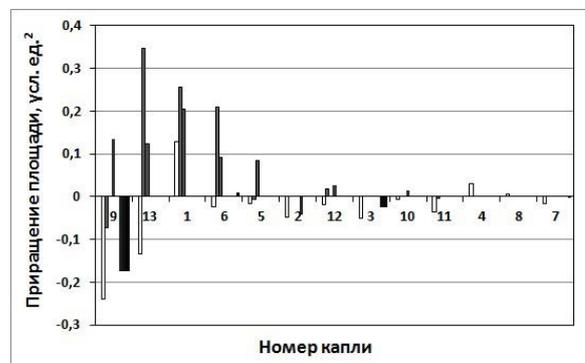
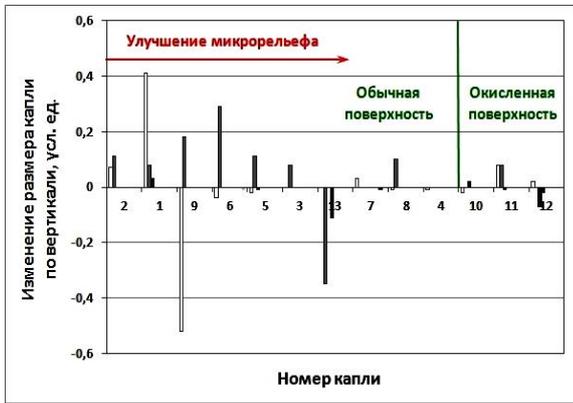


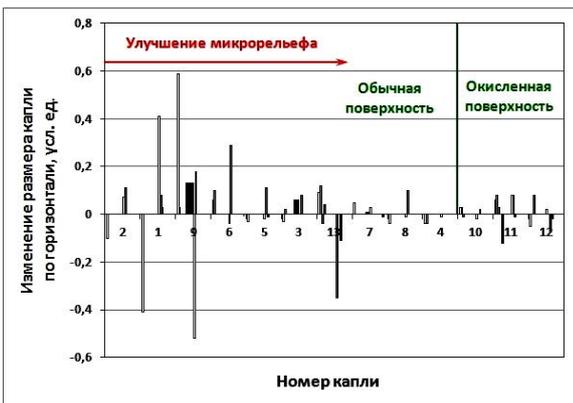
Рис. 3. Реакции площадей капель на изменение значения потенциала смещения

Fig. 3. Droplet areas response to changes in the value of the displacement potential

– чем ровнее микрорельеф поверхности, тем в большей степени изменялись размеры капель, особенно крупных (рис. 4). Изменения шли по следам от механической обработки пластины. Наиболее показательным стало изменение размеров капли № 9, которая, находясь под действием потенциала в 80 В, слилась с каплей № 14 и при последующих значениях потенциала ее размер в горизонтальном направлении начал изменяться более активно (см. рис. 4, б), влияя и на площадь, и на скорость ее изменения. В то же время на участке измененного химического состава (окисление) изменения размеров практически отсутствовали несмотря на то, что расположенные там капли № 10, 11 и 12 находились в непосредственной близости друг от друга (см. рис. 1);



а)



б)

**Рис. 4.** Влияние микрорельефа и химического состояния поверхности на изменения размеров капель при различных значениях потенциала смещения: а – вертикальное направление; б – горизонтальное направление

**Fig. 4.** The effect of microrelief and the chemical state of the surface on changes in droplet sizes at different values of the displacement potential: а – vertical direction; б – horizontal direction

– основным пограничным процессом, протекающим при взаимодействии поверхности с раствором, является процесс адсорбции. Потенциал электростатического поля усиливает этот процесс и активизирует протекание химических реакций. При этом существует оптимальное (для состояния, в котором находится поверхность) значение потенциала (в данном случае оно составило 40 В), при котором реакции протекают наиболее интенсивно. В результате силы межмолекулярного взаимодействия на границе твердой и жидкой фаз ослабевают, что ведет к прекращению процесса растекания. Это означает, что существует конкуренция между процессами адсорбции и поверхностной диффузии, зависящая от интегральной величины комбинации потенциалов поверхности и электростатического поля.

Рассматривая полученные результаты в аспекте достоверности, можно отметить, что они обнаруживаются и/или регистрируются после воздействия на поверхность плазмы [1, 14, 15].

На участках ровной поверхности воздействие приводит к формированию сплошных равномерно распределенных одинаково прогретых зон размером примерно 50...70 нм (рис. 5, а), что указывает на однородность плазмы. На поверхностях же, имеющих различные дефекты (неровности в виде капельной фазы, микровыступы, царапины и др.), контакт с плазмой становится более интенсивным с образованием зон оплавления, локальный прогрев в которых вызывает неравномерный прогрев прилегающих областей и приводит к проседанию поверхности с образованием наноразмерных ступенек или замкнутых террас, которые внешне проявляются как набор вложенных замкнутых кривых (рис. 5, б). Это связано с тем, что на участках дефектов происходит искажение электростатического поля, приводящее к нарушению однородности плазмы, и проявляется в ее расслоении и концентрации в виде пучков вплоть до их шнуrowания. В этом случае на поверхности появляются глухие отверстия диаметром 0,7...1,0 мкм (рис. 5, в).

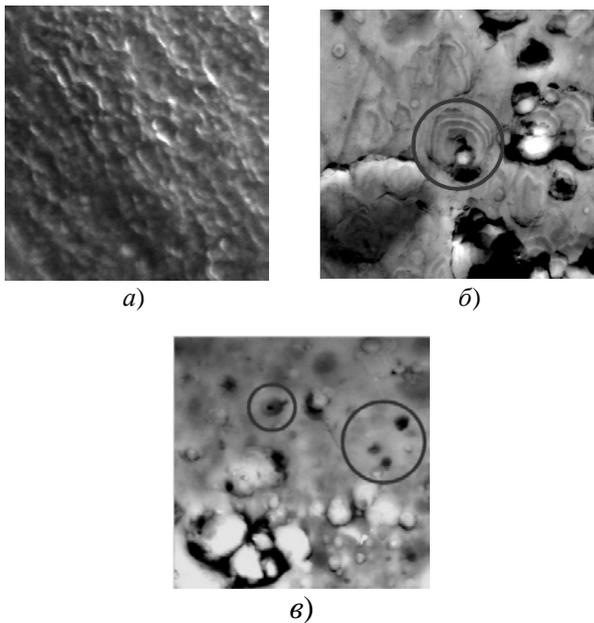


Рис. 5. Примеры электронно-микроскопического изображения результатов воздействия плазмы на бездефектную поверхность (а) и на поверхность в зоне наличия дефектов, вызвавших ее проседание (б) или появление глухих отверстий (в)

Fig. 5. Examples of electron microscopic images of plasma exposure results on a defect-free surface (a) also on a surface in the area of defects that cause its subsidence (b) or the appearance of blind bores (c)

Подача на поверхность оптимального положительного потенциала смещения (или его целенаправленное изменение в условиях изменения состояния поверхности) в ходе воздействия заряженных частиц плазмы (ионов и электронов), позволяет интенсифицировать (или поддерживать на максимально возможном уровне) процессы адсорбции, обеспечивающей (рис. 6):

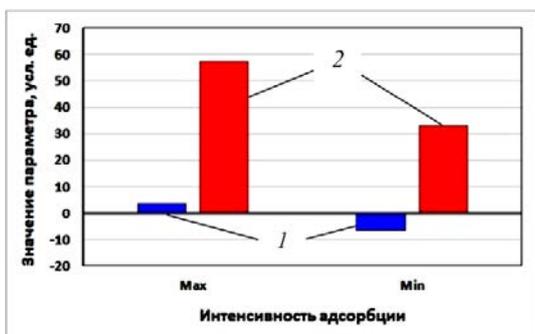


Рис. 6. Вариации среднего суммарного изменения химического состава (1) и средней микротвердости (2) поверхностного слоя в зависимости от интенсивности процессов адсорбции

Fig. 6. Variations of the average total change in the chemical composition also (1) average microhardness (2) of the surface layer depending on the driving rate of the adsorption processes.

– изменение химического состава поверхности в направлении формирования новых связей, что проявляется, в повышении показателей ее электрохимических свойств (стационарный потенциал, поверхностное сопротивление);

– выделение энергии, которая становится дополнительным источником тепла, обеспечивающим повышение степени структурных изменений в поверхностном слое, что проявляется в повышении показателей его физико-механических (микротвердость, степень уплотнения) и электрофизических (сопротивление материала) свойств.

### Выводы

1. Условия, обеспечивающие повышение эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации, можно определять по результатам изучения взаимодействия модифицируемой поверхности с потоком заряженных частиц плазмы.

2. Предложенная технология позволяет определять условия целенаправленно, если проводить изучение как в исходном состоянии поверхности, так и в состоянии, измененном под воздействием частиц плазмы.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Основные результаты и направления дальнейших исследований по низкотемпературному плазменному формированию композитных структур на рабочих поверхностях геометрически сложных металлических изделий // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 20–26.
2. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности: учебник-монография. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. 568 с.
3. Глушков В.Л., Еркович О.С. Характеристики поверхности щелочных металлов с учетом дискретности кристаллической решетки и фриделевских осцилляций электронной плотности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 4. С. 75–89.
4. Партенский М.В. Самосогласованная электронная теория металлической поверхности // Успехи физических наук. 1979. Т. 128. Вып. 1., № 5. С. 69–106.
5. Вольф Г.В., Федоров Д.В. Самосогласованный отклик электронной плотности кристаллической пленки меди на внешнее электростатическое поле // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. Вып. 3. С. 385–390.
6. Инженерия поверхности деталей: под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
7. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.
8. Никитенков Н.Н. Основы анализа поверхности твердых тел методами атомной физики: учеб. пособие.

Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 203 с.

9. **Зимон А.Д.** Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974. 416 с.

10. **Дамаскин Б.Б., Петрий О.А.** Введение в электрохимическую кинетику. М.: Высшая школа, 1983. 400 с.

11. **Салем Р.Р.** Теория двойного слоя. М.: Физматлит, 2003. 104 с.

12. **Chevalliot S., Kuiper S., Heikenfeld J.** Experimental Validation of the Invariance of Electrowetting Contact Angle Saturation // J. Adhesion Sci. Technol. 2011. DOI:10.1163/156856111X599580.

13. **Klarman D., Andelman D., Urbakh M.** A Model of Electrowetting, Reversed Electrowetting, Contact Angle Saturation // arXiv:1102.0791v3[cond-mat.soft] 18 Apr 2011.

14. **Формирование композитных структур на поверхностях сложного профиля воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда: монография / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова.** Старый Оскол: ТНТ, 2017. 140 с.

15. **Brzhozovskii B., Zinina E., Martynov V., Zakharevich A.** The effect of pressure in the working chamber of a processing unit on the quality indicators of the composite structure formed in the metal product surface layer at low-temperature plasma modification // Vacuum, 2022, 205. 111403.

## REFERENCES

1. Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. The main results and directions of further research on low-temperature plasma formation of composite structures on functional surfaces of geometrically complicated metal products// Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 8 (134), pp. 20–26.

2. Roldugin V.I. Physicochemistry of the surface: textbook-monograph. Dolgo-prudniy: Publishing house «Intellect», 2011, 568 p.

3. Glushkov V.L., Yerkovich O.S. Characteristics of the surface of alkali metals taking into account the discreteness of the crystal lattice and Friedel oscillations of electron density // Bulletin of the Bauman Moscow State

Technical University. Ser. Natural sciences, 2017, no. 4, pp. 75–89.

4. Partensky M.V. Self-consistent electron theory of a metallic surface // Successes of physical sciences, 1979, vol. 128, issue 1, no. 5, pp. 69–106.

5. Wolf G.V., Fedorov D.V. Self-consistent response of the electron density of a crystalline copper film to an external electrostatic field // Solid State Physics, 2001. vol. 43, issue 3, pp. 385–390.

6. Surface engineering of parts: edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 320 p.

7. Summa B.D., Goryunov Yu.V. Physico-chemical bases of wetting and spreading. Moscow: Chemistry, 1976, 232 p.

8. Nikitenkov N.N. Fundamentals of the analysis of the surface of solids by methods of atomic physics: textbook. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2012, 203 p.

9. Zimon A.D. Adhesion of liquid and wetting. Moscow: Chemistry, 1974, 416 p.

10. Damaskin B.B., Petri O.A. Introduction to electrochemical kinetics. Moscow: Higher School, 1983, 400 p.

11. Salem R.R. The theory of the double layer. Moscow: Fizmatlit, 2003, 104 p.

12. Chevalliot S., Kuiper S., Heikenfeld J. Experimental Validation of the Invariance of Electrowetting Contact Angle Saturation // J. Adhesion Sci. Technol. 2011. DOI:10.1163/156856111X599580.

13. Klarman D., Andelman D., Urbakh M. A Model of Electrowetting, Reversed Electrowetting, Contact Angle Saturation // arXiv:1102.0791v3[cond-mat.soft] 18 Apr 2011.

14. Formation of composite structures on surfaces of a complex profile by exposure to low-temperature plasma of a combined discharge: monograph / B.M. Brzhozovsky, E.P. Zinina, V.V. Martynov, E.S. Ple-shakova. Stary Oskol: TNT, 2017, 140 p.

15. Brzhozovskii B., Zinina E., Martynov V., Zakharevich A. The effect of pressure in the working chamber of a processing unit on the quality indicators of the composite structure formed in the metal product surface layer at low-temperature plasma modification // Vacuum, 2022, 205. 111403.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

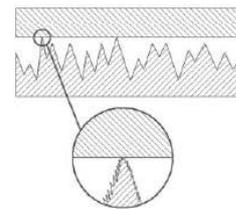
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.12.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 21.12.2023.

The article was submitted 04.12.2023; approved after reviewing 15.12.2023; accepted for publication 21.12.2023.



Научная статья  
УДК 621.785.53:620.178.16.620.186  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-28-40

## Прогнозирование и оценка триботехнической эффективности азотированного слоя деталей машин

Лидия Ивановна Куксенова<sup>1</sup>, д.т.н.

Мария Сергеевна Алексеева<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ГНЦ РФ, Москва, Россия

<sup>1</sup> lkukc@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> alekseeva\_ma@list.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** На основе законов трибологии, триботехники и результатов экспериментальных исследований изменений структуры и свойств в зоне контактной трибодформации конструкционных сталей и сплавов разных структурных классов, подвергнутых азотированию, разработан подход к прогнозированию и комплексной оценке триботехнической эффективности азотирования конструкционных материалов и изделий из них. Анализ закономерностей изменения структуры диффузионной зоны азотированных сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов и относительной износостойкости в зависимости от их состава и технологических параметров процесса обработки показал, что максимальной износостойкостью обладает азотированный слой, содержащий упрочняющие дисперсные частицы некогерентных нитридов, что обеспечивает меньшую склонность к охрупчиванию азотированного слоя вследствие снижения уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы. При этом предварительные виды обработки (термическая и деформационная) азотируемых сталей являются средством формирования структурно-фазового состояния поверхностного слоя, обладающего повышенными триботехническими характеристиками. Для азотированных сплавов на основе железа с разными кристаллическими решетками матрицы экспериментально установлены наиболее значимые характеристики структурного состояния и свойств поверхностных слоев, влияющих на уровень поверхностного разрушения при трении: размер частиц нитридов легирующих элементов, расстояние между ними, плотность их распределения, микродеформация кристаллической решетки матрицы, значения физического уширения рентгеновских линий структурных составляющих материала зоны деформации при трении, твердость азотированного слоя и ее изменения при трении. Эти экспериментальные результаты положены в основу предлагаемого метода оценки и прогнозирования триботехнической эффективности металлов. Его суть состоит в том, что на основе трибологического критерия, содержащего микро- и макроскопические характеристики материала зоны контактной деформации при трении, проводится выбор режимов обработки изделия для обеспечения допустимого уровня интенсивности изнашивания. Затем экспериментально с помощью метода поверхностной пластической деформации оценивается способность азотированного слоя, сформировавшегося в результате обработки по выбранному режиму, воспринимать поверхностную пластическую деформацию без разрушения, что служит обоснованием выбранного режима азотирования. Завершением оценки является определение величин предельной работоспособности азотированного материала в условиях трения и изнашивания (предельно допустимого давления, при котором пара работает устойчиво; критического давления, после которого пара неработоспособна, но возможна ее эксплуатация при кратковременных перегрузках; средней суммарной интенсивности изнашивания пары в целом). Совокупность выявленных параметров позволяет рекомендовать материал, его обработку и прогнозировать режимы эксплуатации и долговечность трибосопряжения.

**Ключевые слова:** конструкционные материалы, азотирование, структура, поверхностные слои, износостойкость, эксплуатационные свойства

*Для цитирования:* Куksenova Л.И., Алексеева М.С. Прогнозирование и оценка триботехнической эффективности азотированного слоя деталей машин // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 2 (152). С. 28–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-28-40

## Forecasting and assessment of tribotechnical efficiency of the nitration case of machine parts

Lidiya I. Kuksenova<sup>1</sup>, D.Eng.  
Maria S. Alekseeva<sup>2</sup>, PhD Eng.

<sup>1</sup> A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS), Moscow, Russia

<sup>2</sup> RDE «Kurchatov Institute» – VIAM, SSC RF, Moscow, Russia

<sup>1</sup> lkuc@mail.ru

<sup>2</sup> alekseeva\_ma@list.ru

**Abstract.** Following the laws of tribology and tribotechnics, also the results of experimental studies of reality of structure and properties change in the zone of contact tribodeformation of structural steels and alloys of different structural classes subjected to nitriding, an approach to forecasting and comprehensive assessment of the tribotechnical efficiency of nitriding of structural materials and products made of them has been developed. Analysis of the patterns of changes in the structure of the diffusion zone of nitriding steels: abnormal, martensitic and austenitic, and relative wear resistance tests, taking into account their composition and technological parameters of the treatment process, showed that maximum wear resistance was provided by a nitration coating containing hardening dispersed particles of incoherent nitrides, ensuring a lower liability to brittle behavior of the nitration case due to low level of matrix level microdeformation. At the same time, preliminary types of treatment (thermal treating and deformation processing) of nitriding steels contribute to structural and phase state of the surface layer, which has added tribological performance. For nitrided ferroalloys with different matrix lattices, the most significant characteristics of the structural state and properties of the surface layers affecting the level of surface fracture under friction have been found empirically: the particle size of nitrides of alloying elements, the distance between them, the density of their distribution, the matrix lattice microdeformation, the values of X-ray lines intrinsic broadening for structural components of the material in the friction deformation zone, the hardness of the nitration case and its changes under friction. These experimental results are taken as a principle of the proposed method for forecasting and assessment of metal tribotechnical efficiency. This principle of method is based on a tribological criterion containing micro- and macroscopic characteristics of the material in the zone of contact deformation under friction, the choice of fabricating methods for the product takes place to ensure an acceptable level of wear intensity. Then, by measurement, using surface large deformation method, the ability of the nitration case formed as a result of treatment according to the selected treatment schedule to perceive surface nondestructive plastic deformation is evaluated. It affords a basis for the selected nitriding treatment schedule. The completion of the assessment is the determination of the values of the maximum operability of the nitriding material under conditions of friction and wear (alarm pressure when a tribocouple operates steadily; critical pressure when it is inoperable, but its operation is possible with short-term overloads; the average total wear intensity of the couple combined). The totality of the identified parameters allows recommending the material, its working and predicting operating modes and durability of tribounit.

**Keywords:** structural materials, nitriding, structure, case, wear resistance, operational properties

**For citation:** Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Forecasting and assessment of tribotechnical efficiency of the nitration case of machine parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 2 (152). P. 28–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-28-40

### Введение

Повышение надежности и долговечности деталей машин является одной из главных проблем современного машиностроения. Как показывает статистический анализ, большинство машин (85...90 %) выходят из строя не из-за поломки, а в результате износа поверхностей отдельных нагруженных деталей. Например, в автомобильной промышленности 60...70 % автомобильных двигателей поступает в ремонт из-за износа подшипников, валов, зубчатых передач, гильз цилиндров и

других пар трения. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышают ее стоимость: для автомобилей в ~6,0 раз, для самолетов до 5,0 раз, для станков до 8,0 раз.

В настоящее время триботехника и трибология развиваются стремительными темпами, которые определяются требованиями создания надежных, долговечных и экономичных машин, приборов, инструментов, технологического оборудования. Неслучайно известный ученый в области надежности машин А.С. Проников назвал

трибологию опорой проблемы надежности и качества машин [1]. При изготовлении узлов трения их надежность достигается применением качественных конструкционных и смазочных материалов, методов обработки, контроля, управления ходом технологического процесса изготовления и сборки, применением современных методов испытаний, доводки и других средств современного технологического уровня. Особое место среди перечисленных средств занимает обеспечение и оценка качества и свойств поверхностных слоев конструкционных материалов.

Технический прогресс отражает стремление конструкторов к использованию таких материалов, которые обеспечат повышение мощности оборудования, длительность эксплуатации без ремонта, живучесть конструкции, в частности создаваемого узла трения. В основу аналитической оценки работоспособности и долговечности узла трения чаще всего входят определяющие показатели механических свойств конструкционных материалов – предел прочности  $\sigma_b$ ; твердость HB; предел текучести  $\sigma_{02}$ ; относительное сужение  $\psi$  и относительное удлинение  $\delta$ ; ударная вязкость (KCV); предел выносливости  $\sigma_{-1}$ ; сопротивление срезу  $\tau_{cp}$  и др. [2].

Известно, что характеристики механических свойств конструкционных материалов зависят от их структурно-фазовых особенностей (типа структуры, ее способности к упрочнению при механической и термической обработке, разных условиях нагружения, разупрочнению при тепловом воздействии, фазовым превращениям). Поэтому в науке о трении и изнашивании одной из ведущих задач является разработка методов направленного, методически и научно обоснованного выбора конструкционного материала и способов воздействия на поверхностные слои деталей с позиций совокупности структурночувствительных свойств, управления поверхностной прочностью твердых тел. Сложность этой задачи состоит в том, что поверхностные микрообъемы контактирующих под нагрузкой и при взаимном перемещении твердых тел в условиях динамических воздействий, характерных для внешнего трения, легче, чем объемные слои, переходят в новое структурное состояние, постоянно корректируя механизм контактного взаимодействия. Закономерности структурных изменений в поверхностных слоях и механизм их контактного взаимодействия взаимосвязаны. В связи с этим разработка мероприятий,

направленных на повышение износостойкости трущихся сопряжений, предполагает углубление представлений о кинетике структурных, фазовых и диффузионных превращений, прочностных свойствах активных микрообъемов поверхности, а также разработку численных критериев качества поверхностного слоя, прогнозирования его работоспособности с позиций оптимального структурного состояния и соответствующих режимов поверхностной обработки, включая химико-термическую.

Для увеличения срока службы машин применяются разнообразные виды химико-термической обработки, которые рассматриваются не просто как способ модификации поверхностных слоев изделий из конструкционных материалов, но и как методы инженерии поверхности [3]. Азотирование служит распространенным способом поверхностной обработки. Принципиальным преимуществом азотирования для промышленности является незначительная деформация формы и размеров деталей. Изменения объема при азотировании невелики и могут быть учтены при изготовлении детали. Объемы шлифования, если оно требуется, малы. Особое место среди достоинств азотирования является обеспечение высокой противозадирной стойкости поверхностного слоя стали [4]. Отмеченные преимущества объясняют непрерывный рост масштабов применения азотирования для повышения долговечности нагруженных деталей машин.

Например, в последнее время усовершенствуются методы химико-термической обработки, в частности азотирования деталей авиационного назначения [5]. Предложен новый метод газового азотирования, позволяющий получать качественные диффузионные слои, отвечающие требованиям эксплуатации изделий авиационного назначения [6], а также стойкости режущего инструмента из стали Р6М5 [7].

В работе [8] приведены основы теории и практики азотирования. Отмечается, что важными технологическими параметрами, обеспечивающими достижение требуемых эксплуатационных характеристик изделий, являются состав и предварительная обработка стали, температура и длительность азотирования, степень диссоциации аммиака. При выборе стали используются чаще всего стандартные механические характеристики  $\sigma_b$ , HB, при этом увеличение твердости считается

основным средством повышения эффективности азотирования.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований изменений структуры и свойств в зоне контактной трибодетформации конструкционных сталей и сплавов разных структурных классов, подвергнутых азотированию, с целью разработки основ критериального трибологического контроля качества поверхностных слоев и прогнозирования их работоспособности в тяжело нагруженных узлах трения.

### Материалы и методы исследования

Исследовали стали и сплавы перлитного и мартенситного классов (40X, 38X2МЮА, ВКС-7, модельные сплавы Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-Al); аустенитную сталь 12X18Н10Т и модельные сплавы на основе  $\gamma$ -Fe, легированные Ni, Cr, Al, Ti. Элементный состав сплавов приведен в табл. 1.

Стали 40X, 38X2МЮА, ВКС-7 подвергали улучшению по стандартным режимам. Модельные сплавы перед азотированием отжигали при

900 °С 2,0 ч. После предварительной обработки исследуемые стали и сплавы подвергали газовому азотированию в среде диссоциированного аммиака и азотированию в тлеющем разряде (ионное азотирование).

Триботехнические испытания проводили по нескольким схемам: на стенде с возвратно-поступательным движением плоских сопрягаемых образцов при давлении  $p = 10 \dots 40$  МПа и скорости скольжения  $v = 0,19$  м/с; на стенде СМЦ-2 в условиях качения с проскальзыванием при  $N = 500$  Н ( $p = 348$  МПа) и  $v = 0,96$  м/с; для схемы скольжения ролика по плоскости использовали машину трения Шкода-Савин при числе оборотов ролика 675 мин<sup>-1</sup> и давлении 150 Н. В качестве смазочных сред применяли разные пластичные смазочные среды и индустриальные масла. Испытания характеризуются условиями тяжело нагруженного контакта. Определяли макроскопическую характеристику пары трения в целом – износостойкость сталей, связанную с уровнем поверхностного разрушения в условиях контактной трибодетформации.

## 1. Состав модельных сплавов

### 1. Composition of model alloys

Химический состав модельных сплавов, (ат, %)									
Модельные сплавы	C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Mn	S	P
Fe + 1%Cr	≤0,020	0,90	0,05	-	-	-	≤0,5	≤0,014	≤0,015
Fe + 2%Cr		2,10	0,05	-	-	-			
Fe + 3%Cr		2,80	0,05	-	-	-			
Fe + 4%Cr		3,90	0,05	-	-	-			
Fe + Mo		0,10	0,05	3,9	-	-			
Fe + Al	0,10	0,04	-	-	3,80	-			
Fe + 29%Ni	≤0,015	-	28,99	-	-	-	-	≤0,015	
Fe + 29%Ni + 1%Cr	≤0,025	0,91	28,66	-	-	-	-		
Fe + 29%Ni + 2%Cr		1,82	28,22	-	-	-	-		
Fe + 29%Ni + 4%Cr		3,66	25,85	-	-	-	-		
Fe + Ni + Cr		3,66	25,85	-	-	-	-		
Fe + Ni + Al		0,10	28,70	-	-	1,91	-	-	
Fe + Ni + Ti	≤0,020	0,10	27,72	-	-	3,37	-		
Fe + Ni + Cr + Al + Ti		1,30	28,00	-	-	0,70	1,60	-	

Кроме того, исследовали конструкционные стали: 38X2МЮА (ГОСТ 4543-71), 40X (ГОСТ 8479-70), ВКС-7, 12X18Н10Т (ГОСТ 5949-75).

Для оценки структурного состояния поверхностных слоев применяли

металлографический, рентгеноструктурный и электронно-микроскопический методы, с помощью которых оценивали микроскопические характеристики материала зоны контактной деформации: физическое уширение рентгеновских линий, фазовый состав, характеристики субструктуры

матрицы и нитридов, размеры упрочняющих частиц, плотность их распределения, критическую плотность дислокаций, запас деформационной способности.

Рассмотрим особенности структурных превращений в зоне контактной деформации стальных азотированных пар трения, которые составили основу для разработки способа оценки и прогнозирования работоспособности азотированных слоев при трении.

Фазовый состав поверхностного слоя по нормали от свободной поверхности для сталей перлитного класса характеризуется следующими составляющими: оксиды  $Fe_3O_4$ ;  $\epsilon$ -фаза ( $Fe_{2-3}N$ ); смесь ( $\epsilon+\gamma'$ )-фаз ( $Fe_{2-3}N$  и  $Fe_4N$ ) в виде чередующихся пластинчатых образований;  $\gamma'$ -фаза ( $Fe_4N$ ) с

тонкими прослойками  $\epsilon$ -фазы;  $\alpha$ -Fe с дисперсными включениями нитридов легирующих элементов. С практической точки зрения поверхностный слой представляет собой две основные составляющие: нитридный слой (соединения железа с азотом) и диффузионную зону (матрицу с распределенными включениями нитридов легирующих элементов). Износ сталей зависит от фазового состава. Экспериментально установлено, что область установившегося режима трения азотированной стали характеризуется двумя уровнями высокой износостойкости:  $0,5 \cdot 10^{-10}$  и  $0,5 \cdot 10^{-9}$  (табл. 2). Заметим, что износ неазотированной стали для тех же условий испытаний составляет величину  $I_h \approx 10^{-8}$ .

## 2. Структура и износ азотированной стали 38X2MЮА

### 2. Structure and wear of nitriding steel 38X2MYA

Расстояние от поверхности, мкм	Фазовый состав	Интенсивность изнашивания $I_h$ ( $P = 10$ МПа)	Положение на кривой изнашивания
0...5,0	Оксиды железа	$10^{-8} \dots 10^{-9}$	Приработка
5,0...20	$\epsilon$ -фаза ( $Fe_{2-3}N$ )	$0,5 \cdot 10^{-10}$	Первый уровень низкого износа
20...25	$\epsilon+\gamma'$ ( $Fe_{2-3}N + Fe_4N$ )	$0,4 \cdot 10^{-9}$	Переход ко второму уровню низкого износа
> 25	Диффузионная зона ( $\alpha$ -Fe + нитриды)	$0,5 \cdot 10^{-9}$	Второй уровень низкого износа

На временном отрезке пути трения, соответствующем периоду приработки, происходит преимущественное разрушение слоя оксидов железа; зона повышенной износостойкости (уровень предельно низкого износа) состоит из  $\epsilon$ -фазы в наноструктурном состоянии. Область перехода во вторую зону высокой износостойкости, характеризуется ростом отношения объемных долей фаз  $\gamma'/\epsilon$ . В зоне второго уровня высокой износостойкости деформационные процессы локализуются в диффузионном слое ( $\alpha$ -Fe + специальные нитриды). Результаты рентгеноструктурного анализа зоны поверхностной пластической деформации стали при трении показали, что переход материала в неработоспособное состояние характеризуется высоким значением физического уширения рентгеновских линий  $\alpha$ -Fe ( $\beta_{(hkl)}$ ), свидетельствующем о накоплении предельной плотности дефектов кристаллической решетки, приводящей к разрушению

поверхности трения. Заметим, что величина  $\beta_{(hkl)}$  связана с плотностью дислокаций  $\rho$  соотношением  $\rho = A[\beta_{(hkl)}]^2$ , здесь  $A$  – не зависящая от  $\beta_{(hkl)}$  размерная постоянная,  $[A] = (\text{см} \cdot \text{рад})^{-2}$ .

Если механизм формирования нитридов железа и их уровень износостойкости очевидны, то механизм образования и роль специальных нитридов в диффузионной зоне с позиций трибологии длительное время носит дискуссионный характер [9]. На основе проведенного нами комплекса экспериментальных исследований материалов, указанных в табл. 1, установлены три основных типа упрочняющей фазы азотированного слоя в сталях перлитного, мартенситного и аустенитного классов. При низких температурах азотирования ( $\sim 500$  °C) формируются тонкие, однослойные зародыши, полностью когерентные с решеткой матрицы; при более высоких температурах ( $\sim 540$  °C) образуются полукogerентные выделения; при

температурах ~560...620 °С наблюдаются нитриды с нарушенной когерентностью. В сталях перлитного и аустенитного классов преимущественным является гомогенное зарождение нитридных частиц, в сталях мартенситного класса (например, ВКС-7) – гетерогенное (при низких температурах азотирования 500...520 °С одновременно присутствуют когерентные зародыши нитридной фазы размером в несколько нанометров и некогерентные, образующиеся на дефектах кристаллического строения, размером 10...15 нм). При комплексном легировании нитридообразующими элементами сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов уменьшается размер нитридов, что связано с изменением коэффициентов диффузии легирующих элементов и азота.

Важную роль в износостойкости азотированных сталей играет микродеформация кристаллической решетки фаз  $\alpha$ - и  $\gamma$ -Fe. Исследования [9]

показали, что максимальная микродеформация кристаллической решетки твердого раствора (матрицы) в сталях перлитного и мартенситного классов достигается при образовании когерентных зародышей нитридов; в сталях мартенситного класса величина микродеформации в 1,5 – 2,0 раза меньше, чем в сталях перлитного класса после всех исследованных режимов азотирования вследствие образования некогерентных нитридных частиц на дефектах строения. В сталях аустенитного класса (12X18H10T и модельные сплавы) максимальная величина микродеформации наблюдается при образовании нитридов с частично нарушенной когерентностью.

Экспериментальные результаты, представленные на рис.1, иллюстрируют связь между макро- и микроскопическими характеристиками азотированного слоя.

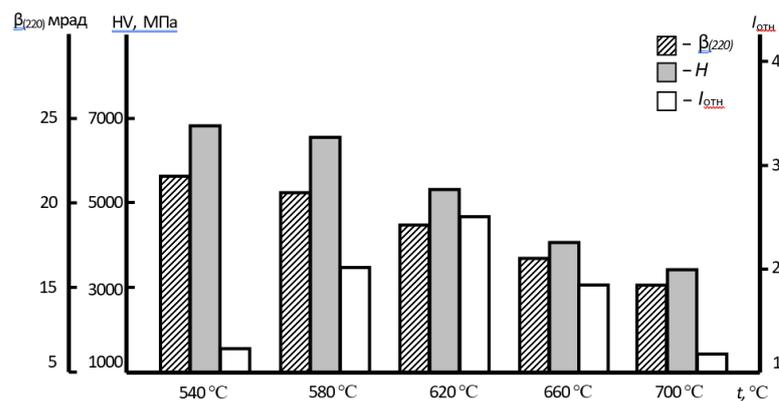


Рис. 1. Влияние температуры азотирования на микротвердость HV, физическое уширение рентгеновских линий  $\alpha$ -фазы  $\beta_{(220)}$  и относительную износостойкость  $I_{отн}$  сплава Fe + 1%Cr

Fig. 1. Influence of nitriding temperature on the microhardness of HV, intrinsic broadening of X-ray lines of  $\alpha$ -phase  $\beta_{(220)}$  and relative wear resistance of the  $I_{rel}$  alloy Fe + 1%Cr

Для сплавов с матрицей феррита характерной особенностью является то, что с повышением температуры азотирования происходит снижение физического уширения рентгеновских линий  $\beta_{(220)}$  (следовательно, плотности дислокаций в поверхностном слое) и твердости. Износостойкость растет и имеет максимальное значение при температуре азотирования 620 °С. Аналогичные исследования сплава Fe + 4%Cr показали, что увеличение концентрации хрома до 4,0 % при сохранении типа кристаллической решетки матрицы не приводит к изменению закономерностей связи  $\beta_{(hkl)}$ ,  $I_{отн}$  и HV; отличаются лишь численные значения, в

частности, износостойкость повышается на 20 % и ее максимум соответствует температуре 660 °С.

Электронномикроскопические исследования этих сплавов показали, что при температуре азотирования 540 °С размер нитридов в сплаве с 1%Cr составляет ~1,5 нм, в сплаве с 4%Cr – ~ 3,0...5,0 нм. Повышение температуры азотирования до 620...660 °С приводит к увеличению размера нитридов в сплаве с 1%Cr до 8,0...10 нм, а в сплаве с 4%Cr – до 11...12 нм. При увеличении размера нитридов уменьшается плотность их распределения и возрастает расстояние между ними, что создает условия для изменения характера движения дислокаций и

облегчения деформации при трении, обуславливая повышение износостойкости. Наибольшая износостойкость достигается при размере нитридов  $\sim 10$  нм, расстояние между которыми составляет 10...15 нм [10].

Влияние типа кристаллической решетки матрицы отражено на рис. 2, где указаны значения твердости HV, физического уширения рентгеновской линии  $\beta_{222}$ , относительной износостойкости  $I_{\text{отн}}$  модельных сплавов с ГЦК-решеткой основы.

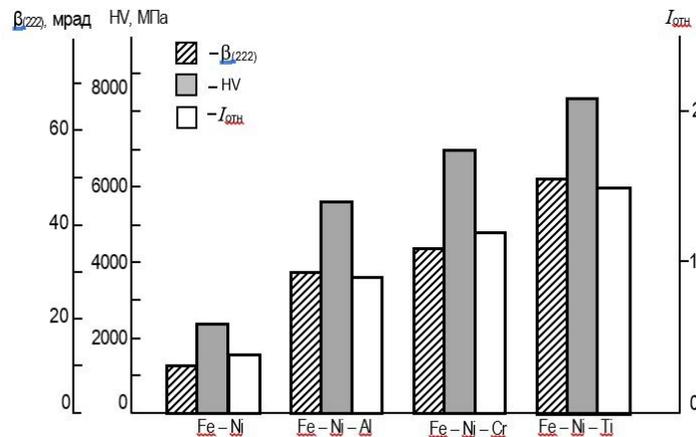


Рис. 2. Влияние типа нитридообразующего элемента на твердость HV, физическое уширение рентгеновских линий  $\gamma$ -фазы  $\beta_{(222)}$  и износостойкость  $I_{\text{отн}}$  азотированного слоя  $t_n = 540$  °C

Fig. 2. Influence of the type of nitride-forming element on the hardness of HV, intrinsic broadening of X-ray lines of  $\gamma$ -phases  $\beta_{(222)}$  and wear resistance  $I_{\text{rel}}$  of the nitrided layer  $t_n = 540$  °C

Все анализируемые макро- и микроскопические характеристики поверхностного слоя сплавов растут в последовательности: Fe-Ni; Fe-Ni-Al; Fe-Ni-Cr; Fe-Ni-Ti и свидетельствуют о влиянии типа легирующего элемента. Электронно-микроскопические исследования показали, что особенности формирования азотированного слоя с разными нитридообразующими элементами связаны с образованием нестабильных зародышей для нитридных фаз, когерентных матрице, изменением их размера и состава, частичным нарушением когерентности по мере повышения температуры азотирования. Стадии формирования структуры азотированного слоя обусловлены разной природой легирующих элементов, а твердость и износостойкость определяются особенностями дислокационной структуры и механизмов движения дислокаций в зависимости от связи решеток матрицы и нитридов (механизм перерезания или огибания частиц дислокациями).

Максимальные упрочнение при азотировании и износостойкость достигаются на стадии, предшествующей образованию

некогерентных частиц. При этом для распространенного диапазона температур азотирования 500...660 °C установлено, что мероприятия, способствующие повышению твердости азотированного слоя аустенитных сталей, позволяют создавать более износостойкие поверхностные слои.

В [11] представлены данные по изменению характеристик поверхностного слоя при трении, связанные с предварительной обработкой азотированной стали. Показано, что температура предварительного отпуска стали и условия нагрева образцов при азотировании оказывают существенное влияние на триботехнические характеристики. Это воздействие является следствием высокой чувствительности структурного состояния к температуре обработки как слоя нитридов железа  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ , так и диффузионной зоны.

Более того, предварительная термическая обработка азотируемых сталей является фактором управления структурой и свойствами азотированного слоя за счет направленного воздействия на процесс образования нитридных частиц заданного размера и

плотности их распределения, а также свойств и структуры слоя нитридов железа, непосредственно прилегающего к свободной поверхности. Поверхностная пластическая деформация, осуществляемая после предварительной термической обработки, приводит к снижению уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы и повышению эксплуатационных свойств азотированной стали (в два раза повышается контактная долговечность). Следовательно, если температура отпуска стали влияет на соотношение когерентных, полуккогерентных и некогерентных нитридных частиц в диффузионной зоне при азотировании, то предварительная поверхностная пластическая деформация корректирует их соотношение в направлении увеличения доли некогерентных выделений, в совокупности способствуя созданию более работоспособного поверхностного слоя в условиях контактной деформации, трения и изнашивания.

Таким образом, для разных температур азотирования и предварительной обработки сплавов на основе железа экспериментальные триботехнические и металлофизические исследования выявили совокупность наиболее значимых характеристик структурного состояния, влияющих на работоспособность поверхностных слоев при трении. К ним относятся размер частиц нитридов легирующих элементов и расстояние между ними, плотность распределения упрочняющих частиц, микродеформация кристаллической решетки твердого раствора на основе железа, значения физического уширения рентгеновских линий матрицы зоны контактной трибодеформации (характеризующей степень деформации стали и плотность дислокаций), твердость азотированного слоя и ее изменения при деформации, показатель запаса пластичности (деформационной способности). Поэтому необходимы такие подходы к оценке триботехнической эффективности азотирования сталей и прогнозированию работоспособности поверхностного слоя в условиях трибоконтактной деформации, которые основываются на комплексе характеристик структурного состояния поверхностного слоя и механических свойств (например, твердости).

На основе накопленного экспериментального материала авторами разработан экспериментальный способ прогнозирования и оценки триботехнической эффективности азотированного слоя деталей машин. Его применение состоит из трех этапов. На первом этапе выбирается режим азотирования на основе трибологического критерия качества азотированной стали [12]. В такой же последовательности устанавливается режим цементации [13].

Рассмотрим аналитическое выражение трибологического критерия качества азотированной стали. В его основу положены физические принципы критериальной оценки цементованной и азотированной сталей. Разработано выражение для обобщенного параметра азотированного поверхностного слоя, деформированного в условиях трения:

$$K_{аз} = \frac{\left[ H_0 + k_1 \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{1,75} [DbA(\beta_{кр}^2 - \beta_0^2)]^2}{\left( k_2 + \frac{e}{8} C_y \right)^2},$$

где  $H_0$  – твердость поверхностного слоя до испытаний;  $k_1$  – экспериментальный коэффициент, определяемый из зависимости  $HВ = f((\Delta d/d)^{1/2})$  для стали [14], где  $\Delta d/d$  – микродеформация кристаллической решетки;  $D$  – средний размер блоков мозаики (оценка этой величины по значениям  $\beta_{(110)}$  и  $\beta_{(111)}$  показала, что в зоне поверхностной пластической деформации азотированного слоя при трении  $D$  в зависимости от условий азотирования изменяется в диапазоне от 15 до 140 нм);  $b$  – вектор Бюргерса;  $A = 2,10^{16} \text{ см}^{-2}$  – коэффициент, зависящий от упругих свойств материала;

$\beta_0$  – физическое уширение линий  $hkl$  исследованных азотированных сталей до испытаний;  $\beta_{кр}$  – значение физического уширения линий, соответствующее критическому значению плотности дислокаций при трибодеформации.

Для определения этой величины пара с азотированным образцом испытывалась на машине трения до формирования задира, о котором судили по резкому увеличению

коэффициента трения и появлению характерных повреждений поверхности. После этого зона поверхностной пластической деформации исследовалась рентгенографически послойно с помощью специально разработанного метода для трибологических исследований без разрушения поверхности и оценивалась величина физического уширения рентгеновских линий, соответствующая материалу тонкого приповерхностного микрообъема, в котором создаются условия для реализации предельной повреждаемости при трении;  $k_2$  – отношение коэффициента, учитывающего форму дислокационных петель и их распределение по линейным размерам ( $\approx 4,0 \dots 5,0$ ), к геометрическому множителю, учитывающему форму зерна ( $\approx 0,785$ );  $e$  – величина диаметра зоны сдвига;  $\delta$  – размер частиц нитридов;  $C_y$  – концентрация нитридов в слое.

Последовательность действий при выборе режима химико-термической обработки состоит в следующем: в соответствии с требованием по уровню износостойкости  $I_{отн}$  (или интенсивности изнашивания, класса износостойкости) и линейной связи  $I_{отн} = f(K_{аз})$ , рис. 3, определяется величина обобщенного структурного параметра  $K_{аз}$  [11].

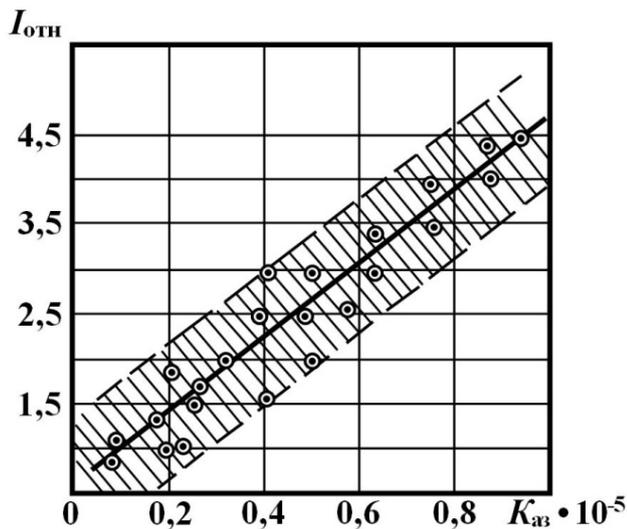


Рис. 3. Зависимость относительной износостойкости  $I_{отн}$  от обобщенного параметра  $K_{аз}$  азотируемых сталей и сплавов

Fig. 3. Dependence of the relative wear resistance  $I_{rel}$  on the generalized parameter  $K_n$  of nitriding steels and alloys

После этого, на основе значения  $K_{аз}$  и структурных характеристик, систематизированным в [9], можно определить соответствующий размер частиц нитридов, расстояние между ними, микродеформацию кристаллической решетки матрицы, значения физического уширения рентгеновских линий азотированного твердого раствора, твердость слоя, запас пластичности. Установленная в соответствии с требованиями уровня износа совокупность характеристик структуры и твердости соответствует конкретному режиму азотирования. При этом допускается некоторый температурный интервал азотирования с учетом легирующего состава стали.

Далее азотированные образцы или изделия проходят второй этап испытаний, а именно экспериментальное обоснование выбора режима азотирования. С этой целью применяется экспресс-метод, основанный на оценке способности поверхностного слоя, сформированного химико-термической обработкой, воспринимать пластическую деформацию без разрушения и упрочняться. Для реализации этого метода возможны любые способы поверхностного пластического деформирования. В качестве примера ниже приведены результаты применения гидродробеструйной обработки азотированной стали 38Х2МЮА.

Результаты оценки приращения микротвердости  $\Delta HV$ , физического уширения рентгеновских линий матрицы  $\Delta\beta_{(220)}$  в результате гидродробеструйной обработки азотированной стали 38Х2МЮА и ее износостойкости после азотирования приведены в табл. 3. Видно, что существует прямая связь между исследуемыми параметрами при изменении температуры азотирования, которая указывает на то, что способность к восприятию деформации и упрочнения поверхностного слоя обеспечивает повышение уровня работоспособности стали при трении. Наибольший триботехнический эффект будет соответствовать наибольшему увеличению  $\Delta HV$  и  $\Delta\beta_{(220)}$ . Повышение макро- и микроскопических характеристик (см. табл. 3) позволяет не только обосновать выбранный режим обработки, но и при необходимости ввести соответствующие корректировки.

### 3. Изменение микротвердости, физического уширения линий при поверхностной пластической деформации и износостойкости азотированной стали 38X2МЮА

### 3. Changes in microhardness, intrinsic broadening of lines under large surface deformation and wear resistance of 38X2MYA nitriding steel

Температура азотирования, °С	$\Delta HV$ , МПа	$\Delta\beta$ , мрад	$I_{отн}$
500	500	2,5	1,5
540	550	4,0	1,7
580	1600	8,0	2,5
620	2500	11	4,5

Метод достаточно прост и не требует длительных испытаний. Его физическая сущность основана на том, что материал, имеющий большой запас пластичности, будет иметь и большую способность аккумулировать энергию деформации без разрушения, что обеспечивает его большую износостойкость в условиях контактной трибodeформации.

После азотирования по выбранному режиму, его корректировки на основе экспресс-оценки способности поверхностного слоя воспринимать поверхностную пластическую деформацию, проводится завершающий этап аттестации азотированной пары трения. Его суть состоит в оценке диапазона работоспособности материалов контактирующей пары [15]. Экспериментально в условиях, наиболее приближенных к реальной эксплуатации, оценивают следующие параметры: предельно допустимое давление  $P_d$ , при котором испытываемые пары работают устойчиво, с наименьшими интенсивностями изнашивания обеих деталей (эта величина отражает несущую способность трибосопряжения); средняя суммарная интенсивность изнашивания всех пар данного сочетания материалов при всех давлениях, включая предельно допустимое  $I_{h\Sigma} = I_{h1} + (l_{1подв} / l_{2неподв}) I_{h2}$  (эта величина отражает предельный износ материалов); критическое давление  $P_{кр}$ , при превышении которого пара неработоспособна,

наблюдаются срывы в катастрофический износ, задиры и заедания. Износостойкость пары трения в диапазоне давлений от  $P_d$  до  $P_{кр}$  также неустойчива, однако давление  $P_{кр}$  позволяет оценить работоспособность пары не только при рабочих нагрузках, но и при кратковременных перегрузках.

Для пары трения получают зависимости  $I_h = f(P)$  и  $f_{тр} = f(P)$ , которые определяют диапазон работоспособности материалов пары и потери на трение и износ в этом диапазоне. Все полученные данные заносятся в так называемый паспорт пары трения, в котором обязательными триботехническими характеристиками являются износостойкость (интенсивность изнашивания  $I_{h1}$ ,  $I_{h2}$ ,  $I_{h\Sigma}$ ), показатель фрикционности (коэффициент трения), несущая способность (предельно допустимое  $P_d$  и критическое давления  $P_{кр}$  или стойкость к заеданию) (рис. 4).

Совокупность данных паспорта пары трения и зависимости интенсивности изнашивания от давления служат экспериментальной основой для инженерных расчетов долговечности пар трения. Заметим, что для ускорения выбора материала пары трения и условий обработки можно воспользоваться базой данных триботехнических характеристик пар трения [9], что позволит устранить повторения в исследовательских работах.

Паспорт пары трения		Сталь 20Х — сталь 38Х2МЮА	№ 40
Триботехнические свойства			
Износостойкость		Фрикционность	
$I_{h1} = 0,81 \cdot 10^{-9}$ ; $I_{h2} = 1,26 \cdot 10^{-9}$ ; $I_{\Sigma \text{cp}} = 0,50 \cdot 10^{-9}$ ; $f_{\delta} = 0,1$			
Стойкость к заеданию: $p_{\delta} > 40$ МПа $p_{\text{кр}} > 40$ МПа			
Материалы			
Деталь неподвижная (1) Сталь 20Х		Деталь подвижная (2) Сталь 38Х2МЮА	
Вид обработки поверхности			
Цементация, закалка 60...65 HRC		Газовое азотирование 60...65 HRC	
Вид смазочного материала – масло промышленное И-30А			
Условия работы			
Относительное движение – возвратно-поступательное			
Нагружение – постоянная прижимающая нагрузка			
Давление в контакте – до 40 МПа и выше			
Скорость скольжения – 0,1...0,2 м/с			
Температура в контакте – $\leq 70$ °С			
Окружающая среда – воздух			
Эмпирические зависимости $I_h(p)$			
$I_{h1} = 0,16 \cdot 10^{-9} + 0,016 \cdot 10^{-9} p$ ; $I_{h2} = 0,59 \cdot 10^{-9} + 0,044 \cdot 10^{-9} p^{0,74}$			
Вероятностные характеристики – средние квадратические отклонения			
$\sigma_1 = 0,24 \cdot 10^{-9}$ ; $\sigma_2 = 0,3 \cdot 10^{-9}$			

Рис. 4. Пример паспорта пары трения

Fig. 4. Example of a friction couple passport

Совокупность данных паспорта пары трения и зависимости интенсивности изнашивания от давления служат экспериментальной основой для инженерных расчетов долговечности пар трения. Заметим, что для ускорения выбора материала пары трения и условий обработки можно воспользоваться базой данных триботехнических характеристик пар

трения [9], что позволит устранить повторения в исследовательских работах.

### Заключение

Работоспособность изделий в эксплуатации определяется совокупностью характеристик механических свойств. В ряде мероприятий, обеспечивающих повышение ресурса работы машин, особое место занимают проблемы

износостойкости материалов. Одним из путей решения задач совершенствования эксплуатационных показателей являются способы направленного модифицирования изделий из конструкционных сталей, в частности азотирование.

Анализ закономерностей изменения структуры диффузионной зоны азотированных сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов и относительной износостойкости в зависимости от их состава и технологических параметров процесса обработки показал, что максимальной износостойкостью обладает азотированный слой, содержащий упрочняющие дисперсные частицы некогерентных нитридов, что обеспечивает меньшую склонность к охрупчиванию азотированного слоя вследствие снижения уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы. При этом предварительные виды обработки (термическая и деформационная) азотируемых сталей являются средством формирования структурно-фазового состояния поверхностного слоя, обладающего повышенными триботехническими характеристиками.

Для азотированных сплавов на основе железа с разными кристаллическими решетками матрицы экспериментально установлены наиболее значимые характеристики структурного состояния и свойств поверхностных слоев, влияющих на уровень поверхностного разрушения при трении: размер частиц нитридов легирующих элементов, расстояние между ними, плотность их распределения, микродеформация кристаллической решетки матрицы, значения физического уширения рентгеновских линий структурных составляющих материала зоны деформации при трении, твердость азотированного слоя и ее изменения при трении.

Разработан экспериментально-аналитический способ прогнозирования и оценки триботехнической эффективности азотированного слоя деталей машин, основанный на совокупности выявленных микро- и макроскопических характеристик пары трения в целом. Его суть состоит в том, что на основе трибологического критерия, содержащего наиболее значимые характеристики материала зоны контактной трибодформации, проводится выбор режимов обработки изделия для обеспечения допустимого

уровня поверхностного разрушения. С помощью метода поверхностной пластической деформации оценивается способность азотированного слоя, сформировавшегося в результате обработки по выбранному режиму, воспринимать поверхностную пластическую деформацию без разрушения, что является обоснованием конкретного режима азотирования. Завершением оценки служит определение величин предельной работоспособности азотированного материала в условиях трения и изнашивания (предельно допустимого давления, при котором пара работает устойчиво; критического давления, после которого пара неработоспособна, но возможна ее эксплуатация при кратковременных перегрузках; средней суммарной интенсивности изнашивания пары в целом, коэффициента трения). Совокупность выявленных параметров позволяет рекомендовать материал, его обработку и прогнозировать режимы эксплуатации и ресурс работоспособности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Проников А.С.** Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. 559 с.
2. **Сорокин Г.М., Малышев В.Н., Куракин И.Б.** Трибология сталей и сплавов. М.: ИЦ РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013. 383 с.
3. **Суллов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
4. **Куксенова Л.И., Симонов В.Н., Алексеева М.С., Пахомова С.А., Козлов Д.А.** Исследование трения, износа и противозадирной стойкости тяжело нагруженных азотированных сопряжений // Трение и износ. 2021. № 3. С. 319–328.
5. **Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибииков П.С.** Совершенствование технологий химико-термической обработки для поверхностного упрочнения высоколегированных сталей авиационного назначения // Научное исследование в машиностроении. 2022. № 8. С. 3–11.
6. **Прокофьев М.В., Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибииков П.С.** Влияние стадийного азотирования на строение и свойства мартенситной стали 13X11H2B2MФ // Научное исследование в машиностроении. 2021. № 12. С. 12–19.
7. **Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е.** Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом // Научное исследование в машиностроении. 2022. № 1. С. 3–10.
8. **Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.И., Бемер З.** Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
9. **Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Оспенникова О.Г., Алексеева М.С., Громов В.И.**

Инженерия поверхности и эксплуатационные свойства азотированных конструкционных сталей / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2019. 600 с.

10. Березина Е.В., Мичугина М.С., Лаптева В.Г., Куксенова Л.И. Влияние технологии азотирования на структуру и износостойкость стали // Деформация и разрушение. 2008. № 2. С. 44–50.

11. Куксенова Л.И., Алексеева М.С., Козлов Д.А. Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 3. С. 23–37.

12. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г., Алексеева М.С. Физические основы критериальной оценки технологии азотирования деталей узлов трения // МТМ. 2012. № 12. С. 39–47.

13. Дроздов Ю.Н., Рыбакова Л.М., Литвинов И.П., Павлик Б.Б., Сидоров С.А. Кинетика разрушения конструкционных сталей при трении // Трение и износ. 1989. № 5. С. 773–778.

14. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.

15. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. 237 с.

## REFERENCES

1. Pronikov A.S. Parametric reliability of machines. M.: Publishing House of the Bauman. Moscow State Technical University, 2002. 559 p.

2. Sorokin G.M., Malyshev V.N., Kurakin I.B. Tribology of steels and alloys. M.: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, RC, 2013, 383 p.

3. Suslov A.G. The Quality of surface layer of machine parts, Moscow: Mechanical Engineering, 2000, 320 p.

4. Kuksenova L.I., Simonov V.N., Alekseeva M.S., Pakhomova S.A., Kozlov D.A. Research of friction, wear and seizure resistance of extra high loaded nitrided couples // Friction and wear, 2021, no. 3, pp. 319–328.

5. Petrova L.G., Belashova I.S., Bibikov P.S. Improvement of chemical and thermal treatment technologies for surface hardening of high-alloy steels for aviation purposes // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 8, pp. 3–11.

6. Prokofiev M.V., Petrova L.G., Belashova I.S., Bibikov P.S. The effect of radial nitrogenization on the structure and properties of martensitic steel 13X11N2V2MF // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 12, pp. 12–19.

7. Petrova L.G., Alexandrov V.A., Vdovin V.M., Demin P.E. Increasing the durability of high-speed steel tools when nitriding with controlled nitrogen potential // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 1, pp. 3–10.

8. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G.I., Boehmer Z. Theory and technology of nitriding. Moscow: Metallurgiya, 1991, 320 p.

9. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Ospennikova O.G., Alexeeva M.S., Gromov V.I. Surface engineering and operational properties of nitriding structural steels / ed. by E.N. Kablova. Moscow: VIAM, 2019, 600 p.

10. Berezina E.V., Michugina M.S., Lapteva V.G., Kuksenova L.I. Nitriding technology effect on the structure and wear resistance of steel // Deformation and destruction, 2008, no. 2, pp. 44–50.

11. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S., Kozlov D.A. Dependence of performance properties of nitriding steels on the structural state of the surface coat // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 3, pp. 23–37.

12. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Lapteva V.G., Alekseeva M.S. Physical foundations of criterial assessment of nitriding technology for parts of friction units // МТМ, 2012, no. 12, pp. 39–47.

13. Drozdov Yu.N., Rybakova L.M., Litvinov I.P., Pavlik B.B., Sidorov S.A. Kinetic of fracture of constructions steel caused by friction // Friction and Wear, vol. 10(5), 1982, pp. 773–778.

14. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Structure and wear resistance of metal. Moscow: Mashinostroenie, 1982. 212 p.

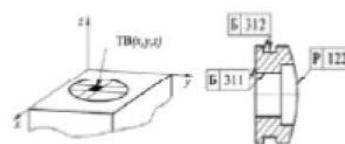
15. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Lapteva V.G. Wear resistance of structural materials. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2011. 237 p.

**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 20.12.2023; одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 29.01.2024

The article was submitted 20.12.2023; approved after reviewing 09.01.2024; assepted for publication 29.01.2024



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №2 (152). С.41-48.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №2 (152). P.41-48.

Научная статья  
УДК 629.735  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

## **Роботизация в авиастроении**

**Виталий Даржаевич Цыденов**, начальник конструкторского бюро  
АО «Улан-Удэнский авиационный завод», Республика Бурятия, Улан-Удэ, Россия  
cvd11316@uuaz.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1098-4852>

**Аннотация.** Рассмотрены некоторые примеры применения роботизированных технологических систем и комплексов (РТС и РТК) в авиастроении. Рассмотрена роботизированная ячейка контактной точечной сварки, основной состав которого это – промышленный робот (ПР), сварочные клещи, модуль линейного перемещения ПР, кантователь. Здесь ПР выполняет сварку, в качестве рабочего органа оборудован сварочными клещами. Кантователь, оснащенный шаговым двигателем производит поворот панели вокруг оси и придает свариваемой детали необходимое положение в процессе сварки. Перемещение ПР также осуществляется за счет модуля линейного перемещения. Рассмотрена роботизация производства жгутов, с применением автоматических плазов и коллаборативных роботов, которые перемещаясь вдоль специализированных плазов, с помощью модуля линейного перемещения, осуществляют расстановку держателей на плаз и вязку проводов в жгуты. После завершения операции укладывают готовые жгуты в бункер-накопитель. Рассмотрен роботизированный технологический комплекс изготовления деталей типа «нервюра», в составе которого ПР, оснащенный вакуумным захватом, технологическое оборудование – пресс вырубной и гибочный. Технологический процесс состоит из двух этапов: вырубка и гибка. Вырубленные заготовки выдуваются из пресса на приемный лоток. ПР выполняет подачу заготовок в рабочую зону технологического оборудования и укладку в соответствующий накопитель. Представлены 3D-модели роботизированных участков, перечислен их состав. В заключении установлена важность анализа технологического процесса, которая должна определить целесообразность роботизации. Представлен алгоритм анализа технологического процесса. Установлено, что внедрение роботизации в определенных технологических процессах позволяет снизить влияние опасных производственных факторов.

**Ключевые слова:** роботизация, промышленный робот (ПР), авиастроение, производство жгутов, заготовительно-штамповочное производство, контактно-точечная сварка

**Для цитирования:** Цыденов В.Д. Роботизация в авиастроении // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 2 (152). С. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

## **Robotics in the aircraft industry**

**Vitaly D. Tsydenov**, Head of the Design Bureau  
JSC Ulan-Ude Aviation Plant, Republic of Buryatia, Ulan-Ude, Russia  
cvd11316@uuaz.ru

**Abstract.** Some cases of robotized systems and complexes (RS and RC) in the aircraft industry are considered. A robotic cell for resistance spot welding is viewed, the main components of which are an industrial robot (IR), welding guns, a linear displacement module of IR, an inverting unit. Here the IR performs welding, it is equipped with welding guns as a hand. An inverting unit equipped with a stepper motor rotates the panel around the axis and sets the part to be welded within the whole welding process. The movement of the IR is also carried out due to the linear displacement module. The robotization of harnesses production is viewed, using automatic lofts and collaborative robots, which, moving along specialized lofts, with the help of a

linear displacement module, install holders on the loft and ties wires into harnesses. After the operation is completed, made-up harness is put into a storage hopper. A robotized complex (RC) for manufacturing parts of the «rib» type is studied. It includes a machine equipped with a vacuum gripper, technological equipment, consisting of a cutting machine and a bending press. The technological process has two stages: cutting and bending. The cut blanks are blown out of the press onto the receiving tray. The IR performs feeding of blanks into the working area of the technological equipment and laying in the appropriate storage unit. 3D models of robotized sites are presented, their components are listed. In conclusion, the importance of analyzing the process operation is proved, when the feasibility of robotization is evident. An algorithm for analyzing the process operation is presented. It has been understood that the introduction of robotics in certain technological processes reduces the impact of hazardous production factors.

**Keywords:** robotization, industrial robot (IR), aircraft engineering, production of harnesses, blank-stamping production, resistance spot welding

**For citation:** Tsydenov V.D. Robotronics in the aircraft industry / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 2 (152). P. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

## Введение

Развитие и распространение роботизации сказывается на различных отраслях и авиастроение не является исключением. Интерес в применении промышленных роботов (ПР) в авиастроении появился в последние десятилетия.

Для увеличения конкурентоспособности, производительности труда стабильности и качества продукции, а также покрытия дефицита производственного персонала авиационной промышленности необходимо проводить роботизацию технологических процессов (ТП). Кроме того, роботизация может решить проблему низкой производительности труда, повысить качество производимой продукции [1].

Проектирование промышленных роботов представляет собой весьма многостороннюю проблему. Необходимо учитывать требования применения проектируемого робота к определенному классу технологических операций [2].

Авиационная промышленность характеризуется небольшими объемами выпускаемой продукции, что накладывает ограничения для внедрения роботизированных технологических систем и комплексов (РТС и РТК), т. к. в условиях серийного производства не всегда целесообразно проводить роботизацию ТП. Поэтому перед внедрением РТС и РТК необходимо проводить аудит производства, который определит узкие места на производстве и целесообразность роботизации.

В статье приведены некоторые примеры применения РТС и РТК в авиастроении.

## Роботизация контактной точечной сварки

При изготовлении панелей летательных аппаратов из листовых материалов находит широкое применение контактная точечная сварка, т. к. обладает рядом преимуществ: возможность получения гладкой поверхности; высокая работоспособность при различных нагрузках.

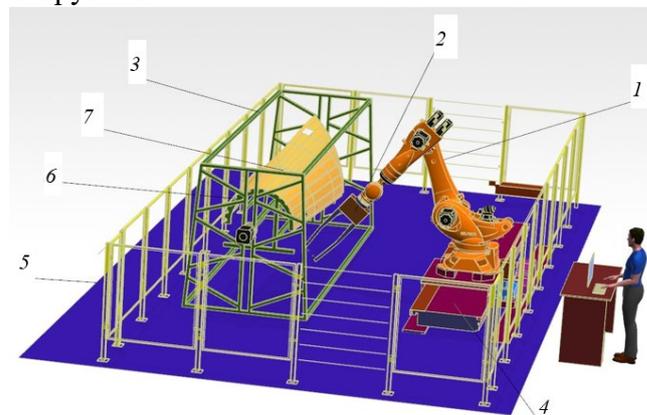


Рис. 1. Роботизированная ячейка контактной точечной сварки

Fig. 1. A robotic cell for resistance spot welding

Точечная сварка – это вид контактной сварки, при котором сваривание деталей происходит по отдельным участкам касания несколькими точками с определённым шагом [3].

Роботизированная ячейка контактной точечной сварки (рис. 1) состоит из промышленного робота 1, сварочных клещей 2, кантователя 3, модуля линейного перемещения робота 4, защитного ограждения с фотобарьерами 5, сменных ложементов 6 и свариваемых деталей 7. На этом участке происходит сварка продольного силового набора с заданным шагом.

После сварки первого ряда, робот перемещается к следующему. Перемещение сварочных клещей вдоль ряда осуществляется как за счет перемещения манипулятора, так и за счет перемещения линейного модуля.

Кантователь, оснащенный шаговым двигателем, производит поворот панели вокруг оси, придавая панели необходимое положение в процессе сварки. Таким образом, робот, перемещаясь от ряда к ряду, производит сварку продольного силового набора всей панели.

Недостатком компоновки роботизированной ячейки, показанной на рис. 1 является то, что при сварке панелей из алюминиевых сплавов требуются большие сварочные токи и усилия сжатия электродов, они зависят от толщины свариваемых деталей, марки материала. Большинство сварочных клещей представленных на рынке производителей не обеспечивают вышеперечисленные условия. Поэтому данная компоновка подходит для сварки панелей, требующих небольших сварочных токов и усилий сжатия электродов.

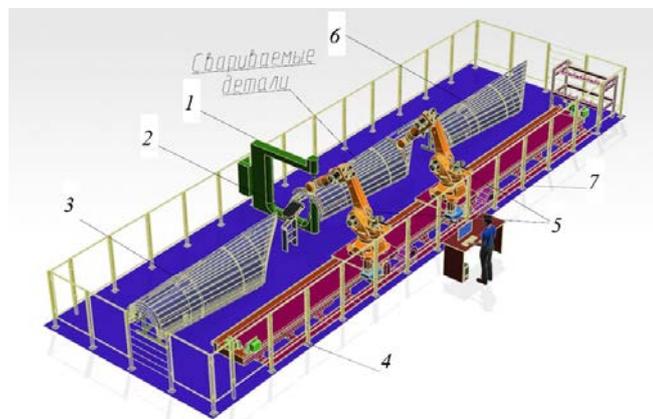


Рис. 2. Роботизированный технологический комплекс сварки панелей

Fig. 2. Robotized complex of panel welding

Стационарные машины для контактной точечной сварки имеют ряд преимуществ по сравнению со сварочными клещами, такие как: большой сварочный ток и усилие сжатия электродов.

Роботизированный технологический комплекс сварки панелей, в составе которого – стационарная машина, представлен на рис. 2. Состав РТК: 1 – стационарная машина для контактной точечной сварки; 2 – техническое зрение; 3 – стол для подачи свариваемых деталей;

4 – модуль линейного перемещения с двумя независимыми платформами; 5 – промышленный робот с захватным устройством; 6 – стол для готовых деталей; 7 – защитное ограждение с фотобарьерами.

Здесь два ПР, работая синхронно, перемещают свариваемую деталь на заданный, конструкторской документацией, шаг. Для устранения перекоса и обеспечения точности позиционирования панели в процессе сварки предусмотрено техническое зрение. Захват детали осуществляется с помощью вакуумных присосок.

Модуль линейного перемещения с двумя независимыми платформами отвечает за перемещение ПР.

При открытии сервисной двери или пересечении фотобарьеров ПР в этой зоне останавливается. При входе оператора в рабочую зону система безопасности ограничивает возможность перемещения робота до тех пор, пока оператор не выйдет и не нажмет кнопку подтверждения на пульте управления.

### Роботизация производства жгутов

В настоящее время процесс изготовления жгутов в авиастроении представляет собой неавтоматизированное производство. Как и много лет назад раскладка и вязка жгутов производится вручную.

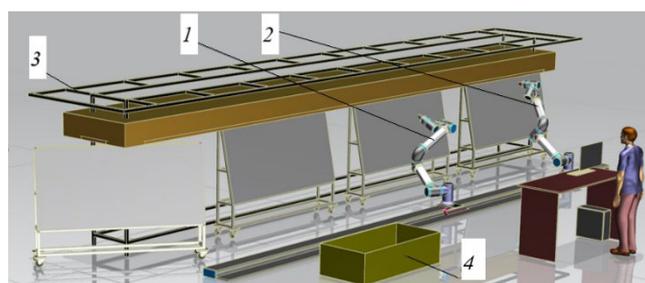


Рис. 3. Роботизированный участок изготовления жгутов:

1 – коллаборативный робот для вязки проводов в жгуты; 2 – коллаборативный робот для раскладки; 3 – специализированный плаз; 4 – бункер-накопитель

Fig. 3. Robotized site for the manufacture of harness:

1 – a collaborative robot for tying wires into bundles; 2 – a collaborative robot for laying out; 3 – a specialized loft, 4 – a storage hopper

Схема роботизированного участка изготовления жгутов представлена на рис. 3. Коллаборативный робот 2 (далее кобот)

производит расстановку держателей на плаз и установку каждой заготовки проводов в нужные держатели. Заготовка за заготовкой кобот 2 делает раскладку [4], затем специализированный плаз перемещается к коботу 1, который осуществляет вязку проводов в жгуты. Плаз представляет собой автоматическую линию с плазмами на тележках (рис. 4), перемещаемых электрическим приводом по полу цеха [5].



Рис. 4. Автоматическая линия сборки жгутов с плазмами на тележках

Fig. 4. An automatic assembly line for harnesses with mould lofts on trolleys

После формирования жгутов, кобот 1 снимает готовые жгуты с плаза и укладывает в бункер-накопитель, откуда поступает на склад готовой продукции. Особенностью коботов является то, что они могут перемещаться вдоль автоматической линии сборки жгутов модулем линейного перемещения.

В целом, производство жгутов в авиастроении представляет огромный потенциал для автоматизации, роботизации процессов.

#### Роботизация заготовительно-штамповочного производства

Особенностью листовой штамповки является незначительное машинное время, затрачиваемое на обработку одной заготовки. Вспомогательными операциями являются операции транспортирования, загрузки и выгрузки штучных заготовок и полуфабрикатов в технологическом оборудовании. Именно они и

определяют в основном производительность листоштамповочных комплексов [6].

РТК (рис. 5 и рис. 6) укомплектован промышленным роботом KUKA установленным на пьедестале между двумя прессами, накопителем для заготовок с щеточно-воздушным разделителем листов, накопителем для вырубленных деталей, накопителями для штампованных деталей, системой управления и системой безопасности. Робот оборудован двухсекционным вакуумным захватом: секция с вакуумными присосками и секция с губчатой подушкой, что позволяет производить захват заготовок как за плоские поверхности (нервиюры), так и за неровные (рифленки).

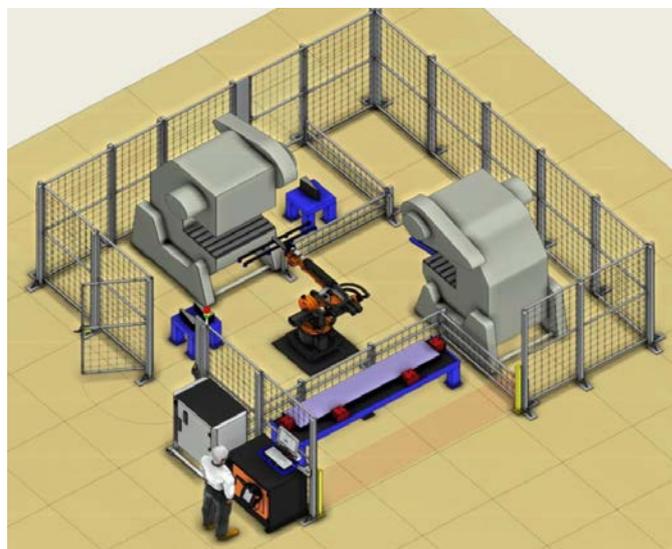
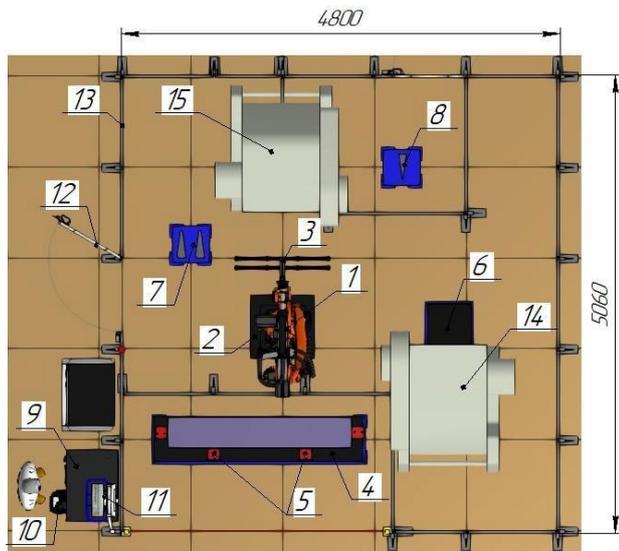


Рис. 5. Роботизированный технологический комплекс изготовления деталей типа «нервиюры»

Fig. 5. Robotized complex for manufacturing parts of the «rib» type

В рассматриваемом РТК технологический процесс состоит из двух этапов: вырубка и гибка. На первом этапе оператор укладывает заготовки в накопитель в рабочей зоне РТК. Промышленный робот с помощью вакуумного захвата снимает заготовку с накопителя. Для облегчения снятия листа с накопителя, а также для исключения возможности взятия слипшихся листов в накопителе установлены щеточно-воздушные разделители.



**Рис. 6. Состав роботизированного технологического комплекса:**

1 – промышленный робот KUKA; 2 – пьедестал для робота; 3 – вакуумный захват; 4 – контейнер с заготовками; 5 – щеточно-воздушный разделитель; 6 – лоток для вырубленных деталей; 7 – накопитель для вырубленных деталей; 8 – накопитель для штампованных деталей; 9 – контроллер ПР; 10 – пульт управления ПР; 11 – стойка управления РТК; 12 – дверь; 13 – защитные ограждения; 14 – пресс вырубной; 15 – пресс гибочный

**Fig. 6. Components of a robotized complex:**

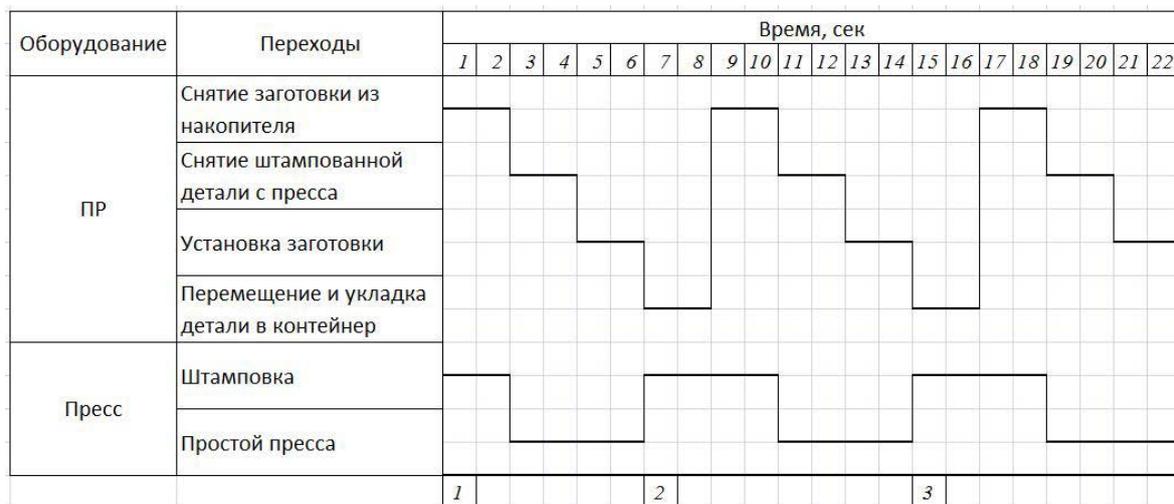
1 – industrial robot KUKA; 2 – mounting pedestal for the robot; 3 – vacuum gripper; 4 – container with blanks; 5 – brush-air separator; 6 – tray for cut blanks; 7 – queue for cut blanks; 8 – queue for formed parts; 9 – IR controller; 10 – IR control panel; 11 – RC control cubicle; 12 – door; 13 – protective barriers; 14 – cutting machine; 15 – bending press

Далее ПР устанавливает заготовку в вырубной пресс. Вырубной пресс совершает цикл вырубki. Вырубленные заготовки выдуваются из прессы на приемный лоток. Далее ПР продвигает лист заготовки в рабочую зону прессы и цикл вырубki повторяется до окончания листа заготовки. ПР перемещает отход листа в контейнер, а вырубленные детали из лотка в накопитель. Для определения местоположения и ориентации вырубленных деталей в лотке применяется техническое зрение.

Далее цикл вырубki повторяется до заполнения накопителя вырубленных деталей или выполнения программы выпуска.

На втором этапе ПР с помощью вакуумного захвата снимает из накопителя заготовку и устанавливает в гибочный пресс. Пресс осуществляет цикл прессования. Затем ПР снимает готовую деталь с прессы и укладывает ее в соответствующий накопитель. Далее цикл гибки продолжается до окончания заготовок для гибки в накопителе. Во время осуществления цикла гибки оператор пополняет накопитель с заготовками для вырубного прессы.

Циклограмма работы ПР по обслуживанию прессы с учетом времени, необходимого для взятия заготовки и штампованной детали, времени на перенос и опускание заготовок и штампованных деталей представлена на рис. 7.



**Рис. 7. Циклограмма работы робота по обслуживанию прессы**

**Fig. 7. Work cycle maintenance work of the robot in pressing**

### Заключение

ПР играют большую роль в техническом перевооружении авиационных предприятий, на базе которых можно автоматизировать, роботизировать существующие технологические процессы.

Анализ технологического процесса (ТП) является одним из наиболее ответственных этапов, от качества выполнения которого в значительной степени зависит эффективность разрабатываемого комплекса [7]. Алгоритм анализа ТП представлен на рис. 8.

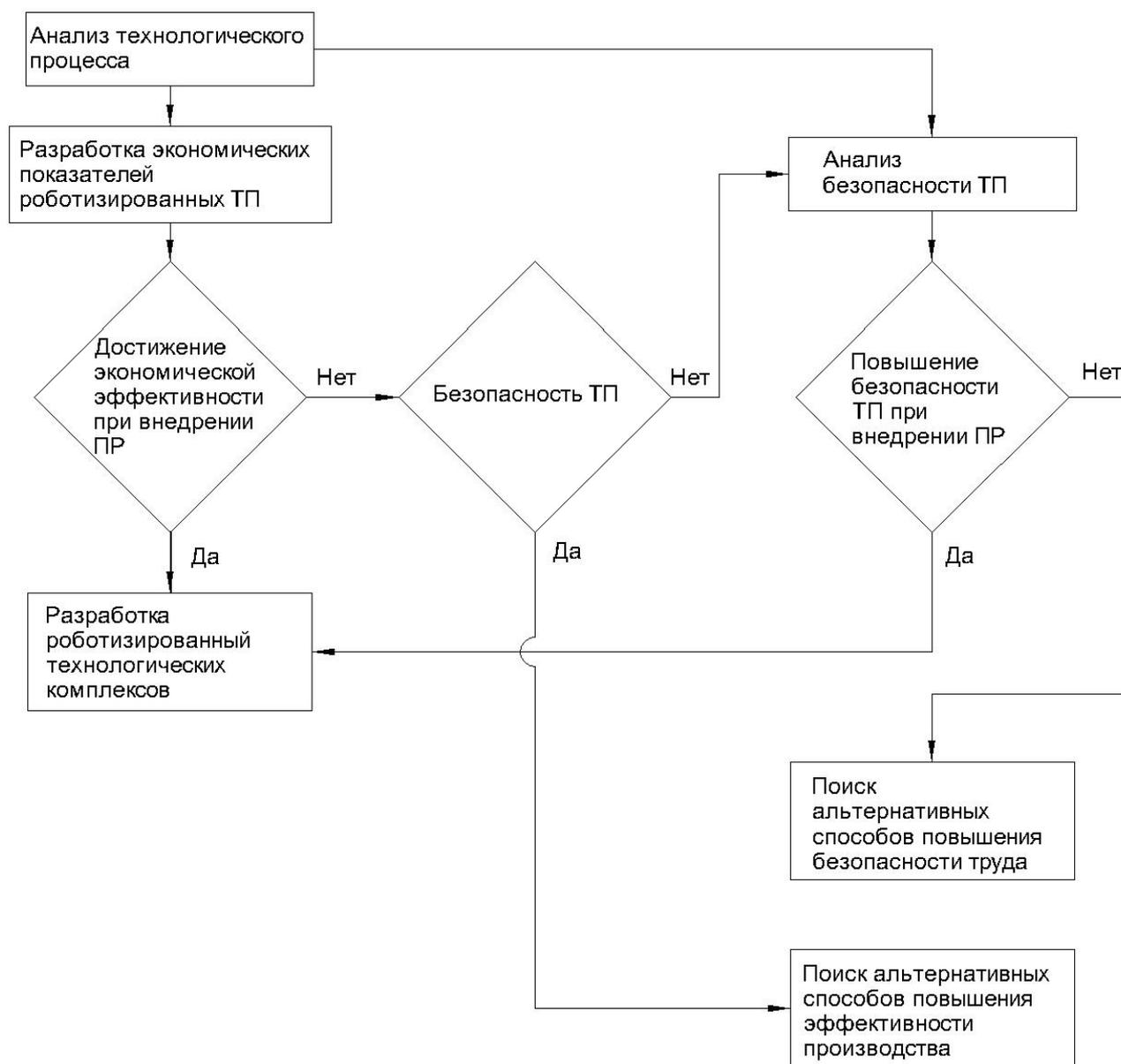


Рис. 8. Алгоритм анализа технологического процесса

Fig. 8. Algorithm of process operation analysis

В условиях серийного производства не всегда получается достичь экономического эффекта от внедрения РТС и РТК, поэтому ключевым фактором внедрения роботизации в

производство может послужить повышение безопасности труда.

При наличии опасных для жизни и вредных для здоровья условий труда решение о

роботизации принимают на основании предварительного отбора независимо от результата технико-экономического обоснования [8].

В работах [9, 10] подтверждается, что одной из причин внедрения роботизации является снижение влияния опасных производственных факторов.

В целом, внедрение роботизации зависит от множества факторов:

- необходимость решения проблем текущей и нехватки кадров;
- необходимость повышения качества продукции;
- возможность технологического перевооружения с минимальными объемами перепланировок производственных помещений.

Понимание и оценка этих факторов являются важным этапом в процессе решения вопроса о внедрении роботизации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Эфендиева А.А., Хаджиева М.И., Канокова М.А.** Исследование влияния процесса массовой роботизации и автоматизации производства на структуру трудовых ресурсов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2019. № 6 (92). С. 186–193.
2. **Колмаков Л.А., Однопалов А.Д., Шарапановская М.С., Шелест Ю.А.** Применение роботов в аэрокосмической промышленности // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2020. Т. 1. С. 374–376.
3. **Контактная** точечная и шовная сварка, её определение и сущность, схемы, технология и оборудование // [Электронный ресурс]. URL: <https://taina-svarki.ru/sposoby-svarki/kontaktnaya-svarka/kontaktnaya-tochechnaya-i-shovnaya-svarka-shemy-tehnologiya-oborudovanie.php>. (дата обращения 16.11.2023 г.)
4. **Сидоров С., Полторыхин Д.** Инновационный подход к роботизации производства кабельных сборок и жгутов // Технологии в электронной промышленности. 2019. № 1. С. 64–69.
5. **Еремин А.** Жгутовые столы: старые проблемы и новые возможности // Технологии в электронной промышленности. 2020. № 6. С. 18–22.
6. **Автоматизированное** проектирование и управление технологическими процессами ОМД: электронное учебное пособие к курсовому проектированию [Электронный ресурс] / В. А. Михеев, Д. В. Савин; Министерство образования и науки Российской Федерации, Самарский государственный

аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет).

Самара. 2011. 8 с. 1 CD-ROM. Системные требования: ПК с частотой ЦП от 800 МГц и выше; Windows XP и выше; дисковод CD-ROM.

7. **Евтеева Е.В.** Применение мехатронных средств в промышленности // Вестник Волжского университета им В.Н. Татищева. 2011. № 17. С. 78–85.

8. **Р 50-54-85-88.** Рекомендации. Проектирование роботизированных технологических процессов. Всесоюзный научно-исследовательский институт по нормализации в машиностроении (ВНИИНАМШ). М. 1988. 26 с.

9. **Стаханова Я.А., Кутузова А.В., Гусев А.Д.** Повышение и анализ безопасности труда в процессах заготовительного производства в машиностроении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 627–631.

10. **Пикалов А.А.** Применение роботизированных систем при сборке авиационных конструкций, содержащих смешанные пакеты КМУ-Ti-Al // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. том 16. №1(5). С. 1550–1556.

## REFERENCES

1. Efendieva A.A., Khadzhieva M.I., Kanyukova M.A. The influence of the process of mass robotization and automation of production on the structure of labor resources // Izvestiya of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2019, no. 6 (92), pp. 186–193.
2. Kolmakov L.A., Odnopalov A.D., Sharapanovskaya M.S., Shelest Yu.A. Application of robots in the aerospace industry // Actual problems of aviation and cosmonautics, 2020, vol. 1, pp. 374–376.
3. Resistance spot and seam welding, its definition and essence, schemes, technology and equipment // [Electronic resource]. URL: <https://taina-svarki.ru/sposoby-svarki/kontaktnaya-svarka/kontaktnaya-tochechnaya-i-sho-vnaya-svarka-shemy-tehnologiya-oborudovanie.php>. (date of access 16.11.2023)
4. Sidorov S., Poltarykhin D. An innovative approach to robotization of cable management and wiring harness production // Technologies in the electronic industry, 2019, no. 1, pp. 64–69.
5. Eremin A. Harness: old problems and new opportunities // Technologies in the electronic industry, 2020, No. 6, pp. 18–22.

6. Computer-aided design and management of MF (metal forming) technological / processes: an electronic textbook for course design [Electronic resource] / V. A. Mikheev, D. V. Savin; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University). Samara. 2011. 8 p. 1 CD-ROM. System requirements: PC with a CPU frequency of 800 MHz and above; Windows XP and above; CD-ROM drive.

7. Evteeva E.V. Application of mechatronic devices in industry // Bulletin of the V.N. Tatishchev Volga State University, 2011, no. 17, pp. 78–85.

8. R 50-54-85-88. Recommendations. Design of robotic technological processes. All-Union Scientific Research Institute for Normalization in Mechanical Engineering (VNIINMASH). M., 1988, 26 p.

9. Stakhanova Ya.A., Kutuzova A.V., Gusev A.D. Improvement and analysis of labor safety in the processes of procurement production in mechanical engineering // Izvestiya TulsU. Technical sciences, 2019, Issue 3, pp. 627–631.

10. Pikalov A.A. Application of robotic systems in the assembly of aircraft structures containing mixed CMU-Ti-Al packages // Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2014, vol. 16, no. 1(5), pp. 1550–1556.

Статья поступила в редакцию 20.12.2023; одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 15.01.2024.

The article was submitted 20.12.2023; approved after reviewing 09.01.2024; assepted for publication 15.01.2024.

---

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

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

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

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

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

Сдано в набор 17.02.2024. Выход в свет 28.02.2024.

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