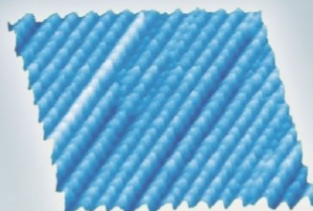


# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

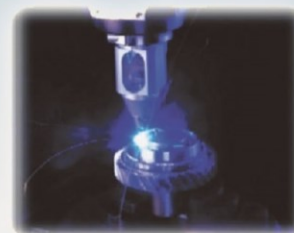
**3** (153)  
**2024**

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

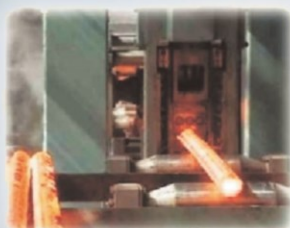


**НАНОТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

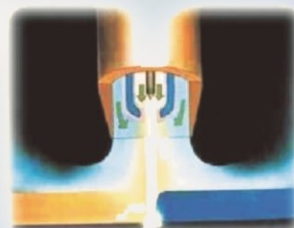
**ЛАЗЕРНЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ**



**ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В СВАРОЧНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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

### 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

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

Макаров В.Ф., Песин М.В., Мяснов М.А., Песин М.М. Моделирование скругления острых кромок наклонных охлаждающих отверстий лопаток турбин методом электроэрозионного фрезерования на многоосевых станках с ЧПУ . . . . . 3

Горленко А.О., Шевцов М.Ю. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения комбинированной электро-механической обработкой . . . . . 12

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

Зимин Д.В., Бреки А.Д., Стариков Н.Е., Селифонтов Д.О., Семенов С.А., Седакова Е.Б. Влияния микроорганизмов и геомодификатора трения на трибологические свойства онсисентных смазочных материалов . . . . . 22

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

Лукашова Е.В., Антипин Д.Я., Лукашов Н.А. Повышение жесткости кузова пассажирского вагона. . . . . 31

Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. Технологическое уменьшение времени приработки поверхностей трения . . . . . 42

*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

**№ 3 (153)**

**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

### TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

**Makarov V.F., Pesin M.V., Myasnov M.A., Pesin M.M.** Modeling of sharp  
edge smoothing of turbine blades angular fans by the method of ED milling  
operation on multi-axis CNC machines ..... 3

**Gorlenko A.O., Shevtsov M.Yu.** Wear resistance increase in cylindrical  
frictional interface using combined electromechanical processing ..... 12

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

**Zimin D.V., Breki A.D., Starikov N.E., Selifontov D.O., Semenov S.A.,  
Sedakova E.B.** Microorganisms effect and friction geomodifier influence  
on the tribological properties of grease lubricants ..... 22

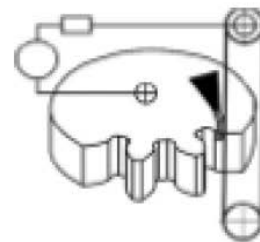
### TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS

**Lukashova E.V., Antipin D.Ya., Lukashov N.A.** Passenger car body stiffening . . . . 31

**Suslov A.G., Shalygin M.G.** Technological running-in time reduce  
for friction surfaces ..... 42

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. №3(153). С.3-11.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №3 (153). P. 3-11.

Научная статья  
УДК 621.91  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

## Моделирование скругления острых кромок наклонных охлаждающих отверстий лопаток турбин методом электроэрозионного фрезерования на многоосевых станках с ЧПУ

Владимир Федорович Макаров<sup>1</sup>, д.т.н.  
Михаил Владимирович Песин<sup>2</sup>, д.т.н.  
Михаил Андреевич Мяснов<sup>3</sup>, аспирант  
Марк Михайлович Песин<sup>4</sup>, студент

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>1</sup> makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

<sup>2</sup> m.pesin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>3</sup> djoker.men@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>4</sup> marking.p05@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы повышения производительности, качества и точности скругления острых кромок многочисленных охлаждающих отверстий в лопатках турбин газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов для современного растущего пассажирского авиационного транспорта на основе разработки новой технологии электроэрозионного фрезерования с применением современных многоосевых станков с ЧПУ с вращающимся полым электродом и высоконапорной подачей специальной смывающей жидкости через тело электрода. Разработан автоматизированный процесс обработки острых кромок на выходе более 200 охлаждающих разнорасположенных наклонных отверстий диаметром 0,45...0,6 мм в одной лопатке, который применяется вместо трудоемкой ручной слесарной обработки различными надфилями, абразивными и металлическими шарошками. Установлено, что в результате выполненного моделирования и разработки специального программного обеспечения стабильно выполняется с высокой точностью равномерный радиус скругления методом автоматического электроэрозионного фрезерования вдоль всей выходной кромки каждого наклонного отверстия в лопатках турбины на многоосевом обрабатывающем электроэрозионном центре. Применение скругленной кромки выходных отверстий обеспечивает более эффективное охлаждение лопаток турбины и более высокие показатели работы газотурбинных двигателей. Одновременно установлено, что с значительным повышением производительности обработки острых кромок лопаток обеспечено более высокое качество поверхностей скругленной кромки отверстий. Результаты проведенных исследований рекомендуются для внедрения на предприятиях авиадвигателестроения.

**Ключевые слова:** лопатки турбины, острые кромки, радиус скругления, электроэрозионное фрезерование, качество поверхности, программирование, траектория электрода

**Для цитирования:** Макаров В.Ф., Песин М.В., Мяснов М.А., Песин М.М. Моделирование скругления острых кромок наклонных охлаждающих отверстий лопаток турбин методом электроэрозионного фрезерования на многоосевых станках с ЧПУ // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

## Modeling of sharp edge smoothing of turbine blades angular fans by the method of ED milling operation on multi-axis CNC machines

Vladimir F. Makarov<sup>1</sup>, D. Eng.  
Mikhail V. Pesin<sup>2</sup>, D. Eng.  
Mikhail A. Myasnov<sup>3</sup>, PhD student  
Mark M. Pesin<sup>4</sup>, student  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia  
<sup>1</sup> makarovv@pstu.ru  
<sup>2</sup> m.pesin@mail.ru  
<sup>3</sup> djoker.men@yandex.ru  
<sup>4</sup> marking.p05@mail.ru

**Abstract.** The article views efficiency improving issues, quality and accuracy of sharp edge smoothing for numerous angular fans in the turbine blades of gas turbine engines made of heat-resistant nickel alloys and used in modern growing passenger aviation transport based on the development of ED milling new technology for modern multi-axis CNC machines with a rotating hollow electrode and a high-pressure fluid supply of a special flush through the electrode body. An automated process for sharp edge machining has been developed for the production of more than 200 differently placed angular fans with a diameter of 0,45...0,6 mm in one blade instead of labor-intensive manual benchwork, where various needles, abrasive and metal rotary files are used. It is found that modeling and the development of special software resulted in a uniform radius of smoothing with high accuracy due to automatic ED milling operation along the entire trailing edge of each angular hole in the turbine blades at a multi-axis machining electro discharge center. The use of a rounded edge of the outlet ports provides more efficient cooling of the turbine blades and higher performance of gas turbine engines. At the same time, it is found that with a significant efficiency improving in blade sharp edge machining, a higher quality of the rounded edge surfaces in the holes is ensured. The results of the conducted research are recommended for the adoption of technologies in the aircraft engine industry.

**Keywords:** turbine blades, sharp edges, rounded radius, ED milling operation, surface quality, programming, electrode trajectory

**For citation:** Makarov V.F., Pesin M.V., Myasnov M.A., Pesin M.M. Modeling of sharp edge smoothing of turbine blades angular fans by the method of ED milling operation on multi-axis CNC machines / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 3 (153). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

### Введение

В Российской Федерации в настоящее время поставлены задачи перед авиационными моторостроительными предприятиями по ускоренному производству большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей, таких как ПС-90А, ПД-8, ПД-14 и др. с характеристиками, не уступающими мировым аналогам газотурбинной техники [1]. Решение этой проблемы на предприятиях моторостроения возможно путем применения новых технологических решений, которые обеспечат существенный рост производительности изготовления при стабильно высоких параметрах качества и конкурентоспособности газотурбинных двигателей. Одним из наиболее трудоемких узлов газотурбинного двигателя является узел газовой турбины, состоящий из дисков, рабочих и сопловых

лопаток из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Лопатки турбин в эксплуатации испытывают высокие силовые и тепловые нагрузки до 1200...1400 °С, поэтому они изготавливаются из жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6У-ВИ, ЧС-70 путем литья по выплавляемым моделям. Для охлаждения профиля пера и полка рабочих и сопловых лопаток турбин выполняются электроэрозионным методом более 200 различных наклонных отверстий малых диаметров 0,45...0,6 мм, через которые подается сжатый воздух (рис. 1). Острые выходные кромки этих наклонных охлаждающих отверстий необходимо скруглить равномерным радиусом до 0,3 мм, т. к. кромки являются концентраторами напряжений и могут вызвать образование сколов, трещин и разрушения лопаток.

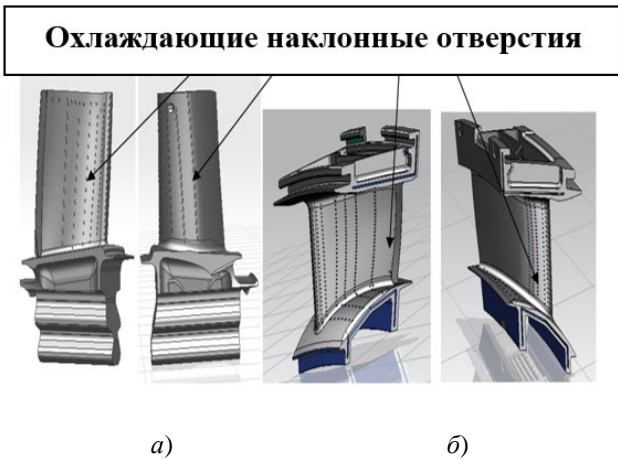


Рис. 1. Общий вид рабочих (а) и сопловых (б) лопаток турбины с охлаждающими наклонными отверстиями

Fig. 1. General view of the working (a) and nozzle (b) turbine blades with angular fans

Для исключения этих факторов в чертежи лопаток внесена конструкция скругленной кромки [2] в виде сложнопрофильного диффузора с шероховатостью  $Ra = 3,2$  мкм и радиусом скругления  $0,2...0,3$  мм. В настоящее время обработка таких кромок проводится вручную с применением различных абразивных и металлических шарошек.

Для решения данной проблемы проведен сравнительный анализ литературы и опыта применения современного оборудования и технологий, предлагаемых различными фирмами для перфорации наклонных охлаждающих отверстий в рабочих и сопловых лопатках турбины.

В результате анализа существующих механических способов обработки скруглений острых кромок в косых отверстиях установлено, что наиболее перспективными являются следующие методы скругления кромок: экструзионное шлифование, электрохимическая обработка, лазерная обработка, механическое фрезерование и электроэрозионное фрезерование. Предложено провести исследование возможности внедрения многоосевой технологии скругления острых кромок охлаждающих наклонных отверстий перфорации турбинных лопаток по методу высокоскоростной электроэрозионной обработки трубчатым электродом на станках с ЧПУ, что даст возможность устранить опасность разрушения кромок и гарантированно обеспечить требуемую величину

расхода охлаждающего воздуха, проходящего через отверстия лопаток.

Дополнительная проблема возникает после нанесения на перо лопаток теплозащитного покрытия, состоящее из нескольких слоёв с окончательной толщиной до  $0,2...0,3$  мм. При этом установлено, что наносимое покрытие уменьшает диаметр отверстий, вследствие чего уменьшается расход продуваемого через них воздуха и эффективность охлаждения.

### Методика проведения исследований

Для проведения теоретических и экспериментальных исследований предложено применить технологию электроэрозионного фрезерования кромок отверстия на электроэрозионных прошивных станках с ЧПУ типа «супердрель» английской фирмы Winbro Group Technologies Ltd модели HSD6-III [3, 4]. Станок имеет семь управляемых осей. Оснащён автоматическим сменщиком инструментов. Инструмент представляет сложный блок, состоящий из тубы для загрузки электродов (до 20 шт.), зажимных цанг и направляющей, конфигурация которой может быть как стандартной цилиндрической формы, так и выполняться в зависимости от особенностей профиля детали.

При электроэрозионном фрезеровании (ЭЭФ) электрод-инструмент представляет собой калиброванную проволоку малого диаметра с осевым каналом. Диаметр электрода-инструмента выбирается в зависимости от кривизны элементов поверхности, подлежащей обработке. Обработка ведется в основном торцевой частью электрода. В процессе обработки инструментом электродом (ЭИ) задается вращение, а рабочей части системой позиционирования задаются поступательные перемещения по основным декартовым осям. Лопатка в приспособлении закрепляется за любой доступный участок, таким образом, чтобы обрабатываемые участки были открыты и доступны для подхода инструмента. Например, рабочая лопатка закрепляется за необработанный хвостовик. Приспособление устанавливается в 3R-оснастку на поворотном-качающемся столе. Ориентация лопатки относительно координатной системы станка производится по шести базовым точкам ощупыванием щупом. При этом

методе базирования реальный профиль лопатки совмещается с теоретическим профилем с заданной точностью. Метод базирования по шести точкам позволяет использовать простое не точное быстросменное приспособление. При этом исключается литейная погрешность и погрешность установки.

Применяемый сегодня технологический процесс изготовления лопаток на АО «ОДК-ПМ» ориентирован именно на ЭЭФ, т. к. применяемое оборудование (станки Winbro HSD6-III) может последовательно выполнять операции прошивки охлаждающих отверстий в лопатке и формирование диффузоров или скруглений кромок отверстий. Однако,

как указано ранее, существует проблема подготовки УП для данного оборудования. Для этих целей существует ряд так называемых САМ систем. САМ (англ. Computer Aided Manufacturing) – автоматизированная система, либо модуль автоматизированной системы, предназначенный для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Активно применяются такие продукты как Siemens NX, ESPRIT, CAMWorks, SprutCAM и PowerMill. В том числе, Siemens NX широко применяется на предприятии АО «ОДК-ПМ» [10]. Общие виды электроэрозионного станка фирмы Group Technologies Ltd, показаны на рис. 2.

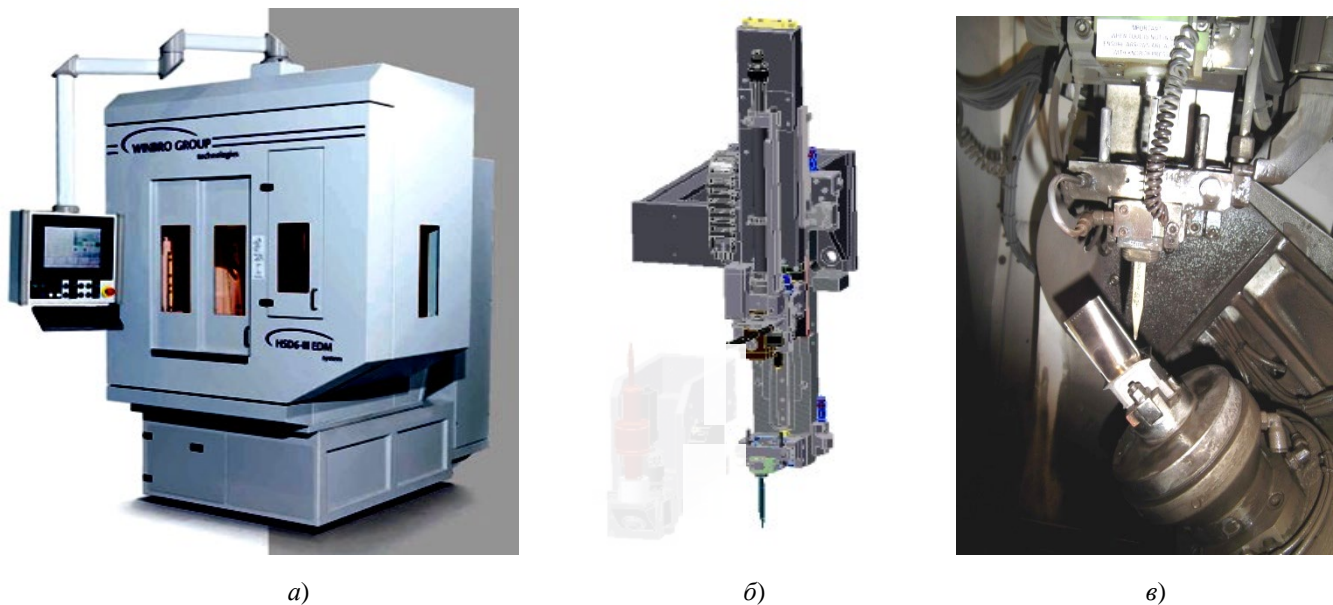


Рис. 2. Общие виды электроэрозионного станка фирмы Winbro Group Technologies Ltd (Англия) модели HSD6-III (а), электроэрозионной головки станка (б) и зоны обработки отверстий в рабочей лопатке одиночным полым электродом (в)

Fig. 2. General views of the Winbro Group Technologies Ltd (England) model HSD6-III (a), spark-erosion head (b) and the machining area with a single hollow electrode in the working blade (c)

В ЧПУ станках есть специальный программный модуль, позволяющий производить обработку отверстий в виде воронки на плоских участках. Особенностью станков является наличие семи одновременно управляемых координат. Кроме этого, имеется возможность выполнения обработки рядов отверстий мультиэлектродом. Наличие магазина инструментов и возможности автоматической замены электродов в процессе обработки позволяет сократить вспомогательное время выполнения операции и значительно повысить качество

обработки. Станки, специализированные на такую обработку, называют супердрелями. В качестве рабочих жидкостей используются дистиллированная вода и специальные составы на водной основе. Рабочая жидкость под давлением подается через отверстия в ЭИ и оптимально удаляет из отверстия частички шлама и образующиеся газы. Электроды направляются через кондукторные втулки, изготавливаемые из алмаза, сапфира и др. сверхтвердых материалов. Благодаря оборудованию класса «Супердрель» появилась возможность

выполнять в охлаждаемых лопатках турбины отверстия диаметром 0,2...0,3 мм на глубину до 10 мм, а также расфрезеровывать фаски на выходе их отверстия этим же электродом [4, 5]. Изготовление таких отверстий традиционными методами сопряжено с большими трудностями, а иногда вообще невозможно.

В настоящее время для перфорации лопаток электроэрозионным способом используются электроды-инструменты двух типов – трубчатые и стержневые с диэлектрической оболочкой. Фирма Winbro выпускает трубчатые электроды диаметром до 0,3 мм для скоростной электроэрозионной обработки. Инструмент сконструирован с учетом оптимального расстояния между цангой и направляющей, что позволяет быстро перемещаться от отверстия к отверстию, даже имея короткий

электрод, т. к. заправка и вытягивание электрода требуются не часто.

Управляющая программа станка частично параметризирована, т. е. координаты перемещения и обработки отверстий рассчитываются станком автоматически. Программа имеет упрощенный алгоритм расчета координат, поэтому после обработки форма обработанных кромок отверстий отличается от требований конструкторской документации и больше похожа на фаску.

Для обеспечения обработки отверстий в различных плоскостях и координатах лопатки устанавливаются по базовым поверхностям в специальном многоосевом поворотном приспособлении (при помощи резьбовой шпильки, проходящей через внутреннюю полость (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид установки и разворота рабочей лопатки турбины в многоосевом поворотном приспособлении

Fig. 3. General view of the installation and rotation of the turbine working blade in a multi-axis rotary device

Система ЧПУ выдает команду на контроль геометрии лопатки с помощью контрольного щупа, и лопатка позиционируется по шести контрольным точкам путем разворота и совмещения с геометрической моделью лопатки.

#### Разработка математической модели равномерного скругления выходной кромки наклонного отверстия в турбинной лопатке

Для выполнения скругления острых кромок на станке с ЧПУ согласно требованиям конструкторской документации необходимо разработать программу перемещения электрода вдоль конкретной кромки в виде замкнутого ребра. Теоретические исследования методов получения траектории инструмента для

обработки скругленной кромки наклонных отверстий приведены в работах [6 – 8].

Геометрия скругленных кромок в лопатках выстраивается по множеству дуг скругления вдоль теоретического ребра пересечения стенки отверстия с профилем пера лопатки. Сложность описания геометрии скругления кромки отверстия лопатки состоит в том, что поверхность лопатки является криволинейной. Векторы нормали теоретического ребра расположены под различными углами.

Для расчета скругления необходимо иметь точное описание прилегающей к отверстию поверхности. Однако в некоторых случаях область вокруг отверстия можно рассматривать как сумма плоскостей, т. к. размеры отверстия и скругления достаточно малы по сравнению с радиусом кривизны профиля лопатки.



Данное допущение использовано для дальнейшего проектирования математической модели.

Диффузор на лопатке, с точки зрения технологии обработки, является низкотехнологичным конструктивным элементом, т. к. имеет сложную геометрию, которую затруднительно получить простыми технологическими движениями. Размер обрабатываемых элементов варьируется в пределах 0,05...0,8 мм. Материал заготовки относится к группе труднообрабатываемых материалов. Эти свойства накладывают ограничения на применение традиционных методов механической обработки, ввиду низкого срока службы обрабатывающего инструмента и его дороговизны. Поэтому и предложено электроэрозионное фрезерование на станке с ЧПУ.

Создание непараметризированной управляющей программы (УП) по геометрической (теоретической) модели с использованием системы автоматизированного проектирования затруднено в виду специфики оборудования. Для разработки УП на обработку скруглений отверстий на станке WINBRO необходимо иметь постпроцессор на данный станок. Реальный объект имеет пространственные отклонения профиля относительно теоретической модели до 0,05 мм на сторону. Таким образом, даже качественно спроектированная УП по теоретической модели должна иметь возможность автоматической коррекции координат согласно реальному объекту. Оборудование должно обеспечить сканирование реальной геометрии объекта с требуемой точностью и передачу данных сканирования в систему ЧПУ.

При разработке управляющих программ для ЭЭФ на станке необходимо предусмотреть возможность поддержания постоянного зазора между деталью и инструментом электродом ЭИ. На данный момент в ЭЭФ системах зазор и износ контролируется по множеству косвенных параметров. Размерный износ ЭИ непосредственно влияет на точность обрабатываемой геометрии. Поэтому в управляющей программе или в системе ЧПУ должны быть предусмотрены функции вычисления и компенсации размерного износа ЭИ.

В результате проведенного анализа установлено, что кромка наклонного отверстия является линией пересечения плоскости и

цилиндра и представляет собой эллипс [2]. Вектора нормалей на плоской поверхности расположены согласно рис. 4, а, расположение векторов нормалей на цилиндрической части показаны на рис. 4, б. Принцип скругления криволинейного ребра показан на рис. 4, в. В каждой точке еще не скругленного ребра существует вектор нормали этого ребра.

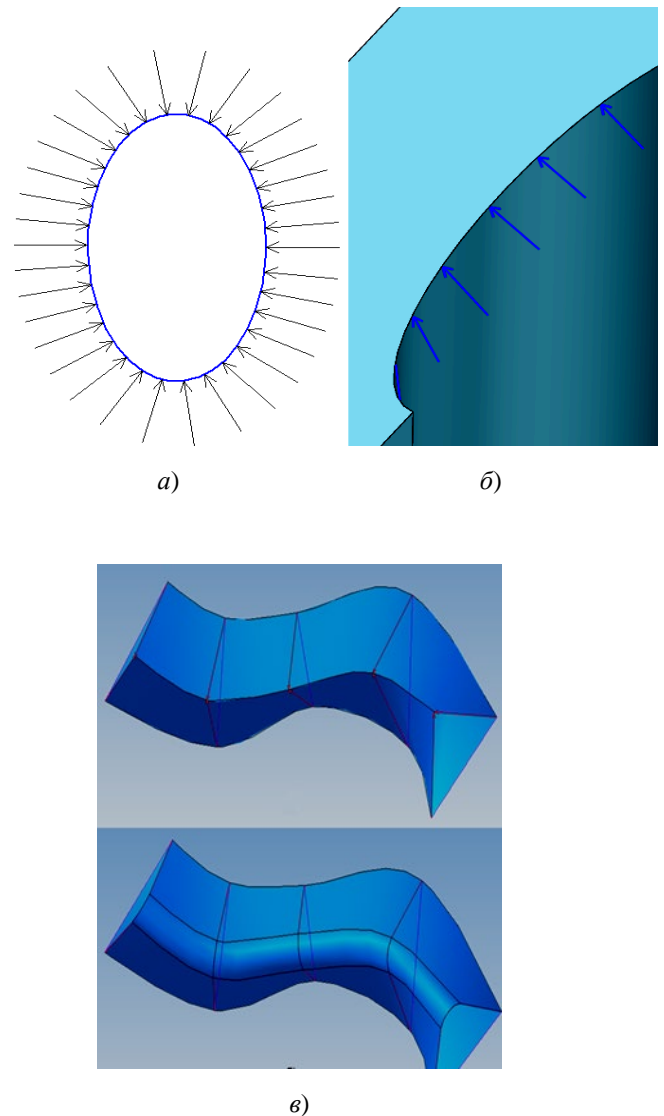


Рис. 4. Результаты геометрического анализа расположения острых кромок наклонных отверстий (а, б) и результат последовательного скругления острой кромки (в)

Fig. 4. Results of geometric analysis of the location of the angular holes sharp edges (a, b) and the result of sequential sharp edge smoothing (c)

Данный вектор может быть спроецирован на обе сопрягающиеся грани, точнее на плоскости касательных к этим граням. Так

получаются два вектора проекции нормали. В плоскости проходящей через эти вектора возможно построить кривую скругления. Двигаясь вдоль ребра, можно получить множество плоских кривых скругления.

На данный момент проведен эксперимент скругления кромок на электроэрозионном станке Winbro HSD6-III по специальной управляющей программе, разработанной на фирме

Winbro Group. Управляющая программа частично параметризована, т. е. координаты обработки рассчитываются станком автоматически. Однако программа имеет упрощенный алгоритм расчета координат, в результате чего форма обработанных кромок отверстия имеет отклонения от заданной формы и больше похожа на неровную фаску (рис. 5).



Рис. 5. Геометрия и вид фактического скругления кромок отверстий лопаток турбин, обработанных электроэрозионным фрезерованием по программе фирмы Winbro Group

Fig. 5. Geometry and type of actual rounding of the edges in the holes of turbine blades using ED milling operation according to the Winbro Group program

Создание УП для обработки равномерного скругления кромок наклонных отверстий и симуляцию обработки проведено в среде Siemens NX [10]. Размеры конструктивных элементов и инструмент масштабированы с соблюдением пропорций.

Для этого смоделированы геометрические модели детали и заготовки. Для упрощения модели рассмотрен случай расположения выхода отверстия на плоскую грань (рис. 6) до и после обработки скругления. При построении принят диаметр отверстия 20 мм, радиус скругления 10 мм.

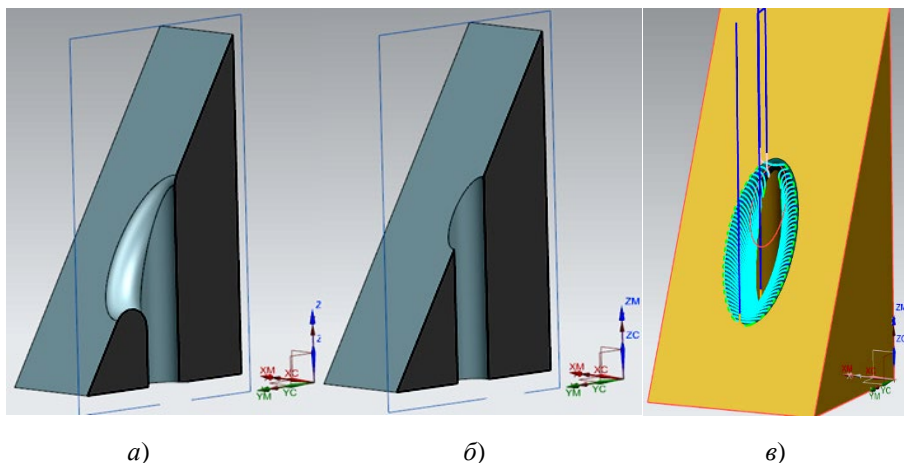


Рис. 6. Геометрические модели обработки выходной кромки отверстия на наклонную плоскость: а – после скругления кромки; б – до скругления кромки; в – визуализация процесса скругления

Fig. 6. Geometric models of hole trailing edge machining on an inclined plane: а – after edge smoothing; б – before edge smoothing; в – visualization of smoothing

На основании анализа геометрии обрабатываемых лопаток разработана математическая модель и алгоритм построения геометрии скругления кромки наклонного отверстия. При разработке приняты допущения, о том, что вектора нормалей расходятся радиально от оси отверстия и область вокруг отверстия является относительно плоской.

На основе математической модели и алгоритма спроектирован прототип управляющей программы на языке Visual Basic с использованием пакета Microsoft Excel в среде разработчика. Программа содержит в себе унифицированные операторы и структуры. Результаты работы программы экспортированы в САПР «КОМПАС-3D» и САМ «NX Обработка». В САМ «NX Обработка» проведена симуляция обработки с выводом геометрии обработанной поверхности в виде фасетного тела. По результатам установлено, что программа достаточно точно рассчитывает геометрию скругления и траекторию движения инструмента.

### Обсуждение результатов моделирования

По результатам моделирования проведен анализ полученной геометрии скругленных кромок наклонных отверстий. Установлено, что форма скруглений не совсем соответствует требованиям конструкторской документации (КД) на лопатках турбины высокого давления (ТВД). Это связано, по-видимому, с упрощением предложенного расчета геометрии скругления. Для решения проблемы необходимо разработать более гибкие автоматические программы, способные адаптировать траекторию обработки в зависимости от реальной геометрии. Для этого необходимо создать математическое описание обрабатываемой поверхности и провести некоторые доработки. Так, при расчете точек дуги скругления расстояние между точками не равномерное. Для равномерного распределения точек добавлен модификатор шага приращения координаты полярного радиуса. При обработке инструментом большого, относительно размеров отверстия, диаметра возникают зарезы и уступы на необрабатываемой поверхности. Связано это с применением упрощенного корректора на диаметр инструмента. При обработке дуги скругления при остром локальном угле глубина обработки

может быть достаточно большой, для этого предусмотрено построение траектории с обработкой в несколько проходов. При адаптации программы на многоосевой электроэрозионный станок добавлен блок расчета износа инструмента и блок корректировки координаты высоты в соответствии износу.

### Выводы

На основании теоретических исследований спроектирован программный продукт, благодаря которому может быть автоматически рассчитана траектория движения электрода – инструмента при обработке равномерного скругления выходной кромки наклонного отверстия в различных лопатках турбин газотурбинных двигателей. Выходные данные разработанной программы пригодны для экспорта в САМ системы. Программа, после приведенной выше доработки, может быть интегрирована в систему ЧПУ для последовательного расчета точек во время обработки.

Результаты проведенных исследований рекомендуются для внедрения на предприятиях авиадвигателестроения. Для установки программного продукта на конкретный станок необходимо изменить названия операторов согласно выбранной системы ЧПУ.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л.** Газотурбинные двигатели. Пермь, 2006. 1195 с.
2. **Конструкция** основных узлов двигателя ПС-90А. Учеб. пособие – 2-е изд. испр. и доп. / М.А. Нихамкин, М.М. Зальцман. Перм. гос. техн. ун-т. Пермь 2002. 108 с.
3. **Бойко А.Ф.** Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314 с.
4. **Владыкин А.В., Макаров В.Ф.** Повышение эффективности обработки отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов на основе применения метода электроэрозионного сверления // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. 2010. № 2 (17). С. 29–37.
5. **Владыкин А.В., Макаров В.Ф.** Расчёт производительности высокоскоростной электроэрозионной обработки отверстий в жаропрочном сплаве полым вращающимся электродом-инструментом // Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении

(ТМ – 2012): материалы IV Междунар. науч. – техн. конф., посвящ. 75-летию В.Ф. Безъязычного, 3-5 сент. 2012 г., Рыбинск: в 2 ч. / М-во образования и науки РФ [и др.] Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьёва, 2012. Ч. II. С. 135–142.

6. **Физико-химические** методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: Учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, А.А. Митрофанов и др.; Под ред. Б.П. Саушкина. М.: Дрофа, 2002. 656 с.

7. **Бойцов А.Г., Токмакова Т.В., Денисов Л.В.** Особенности и технологические возможности некоторых схем электроэрозионного фрезерования // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 106. С. 97–99.

8. **Верман В.Ю., Дедков В.М., Казанцев Е.А.** Способ электрохимического скругления кромок отверстия // Патент СССР № 367996, 1973. Бюл. № 9.

9. **Журавлев Г.И., Шаймарк Л.С., Орлов П.Н., Александровская Т.А., Кукушкин А.С., Преснов В.Н.** Способ электрообработки отверстий малого диаметра // Патент СССР № 180855, 1993. Бюл. № 14.

10. **Михеев Р.** VBA и программирование в MS Office для пользователей. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 369 с.

## REFERENCES

1. Inozemtsev A.A., Sandratsky V.L. Gas turbine engines. Perm, 2006, 1195 p.

2. The design of the main components of the PS-90A engine. Study guide – 2nd ed., revised and enlarged / M.A. Nihamkin, M.M. Zaltsman. Perm, State Technical University, Perm, 2002, 108 p.

3. Boyko A.F. Efficient technology and equipment for electroerosive firmware for precision microholes monograph. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2010, 314 p.

4. Vladykin A.V., Makarov V.F. Efficiency improving when machining small diameter holes in parts made of heat-resistant alloys based on the use of the method of electrosark drilling // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov. 2010, No. 2 (17), pp. 29–37.

5. Vladykin A.V., Makarov V.F. Calculation of the productivity of high-speed electroerosion treatment of holes in a heat-resistant alloy with a hollow rotating electrode-tool // Science-intensive technologies in mechanical engineering and aircraft engine building (ТМ – 2012): proceedings of the IV International Scientific and Technical conf., dedicated to the 75th anniversary of V.F. Bezyagny, 3-5 September 2012, Rybinsk: in 2 parts/ Ministry of Education and Science of the Russian Federation [et al.] Rybinsk: P.A. Solovyov Russian State Technical University, 2012, Part II, pp. 135–142.

6. Physico-chemical processing methods in the production of gas turbine engines: Textbook / Y.S. Eliseev, V.V. Krymov, A.A. Mitrofanov, et al; Edited by B.P. Saushkin. Moscow: Drofa, 2002, 656 p.

7. Boytsov A.G., Tokmakova T.V., Denisov L.V. Features and technological capabilities of some schemes of ED milling operation // Proceedings of GOSNITI. 2010, vol. 106, pp. 97–99.

8. Veroman V.Yu., Dedkov V.M., Kazantsev E.A. Method of electrochemical rounding of hole edges // USSR Patent USSR, No. 367996, 1973, Bul. No. 9.

9. Zhuravlev G.I., Naimark L.S., Orlov P.N., Alexandrovskaya T.A., Kukushkin A.S., Presnov V.N. Method of electrical processing of small diameter holes // Patent USSR, No. 180855, 1993, Bul. No. 14.

10. Mikheev R. VBA and programming in MS Office for users. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2006, 369 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 14.02.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2024; принята к публикации 24.02.2024.

The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 19.02.2024; assepted for publication 24.02.2024.

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-21

## Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой

Александр Олегович Горленко<sup>1</sup>, д.т.н.

Михаил Юрьевич Шевцов<sup>2</sup>, аспирант

<sup>1,2</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> bugi12@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0807-9537>

<sup>2</sup> mih09mmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5457-6342>

**Аннотация.** Рассмотрена технология и технологическая оснастка для формирования износостойкого поверхностного слоя имплантацией материалов на основе карбида вольфрама. Исследовано влияние имплантированного порошка карбида вольфрама на формирование в поверхности трения углеродистой стали градиентных износостойких структур, образующихся в процессе реализации технологии комбинированной электромеханической обработки (ИКЭМО). В следствии термосилового воздействия в зоне пластической деформации протекает интенсивная аустенизация стали с растворением порошка карбида вольфрама и последующим образованием композиционных высокодисперсных структур в результате распада пересыщенного вольфрамом переохлажденного аустенита. Проведены комплексные сравнительные испытания на трение и изнашивание конструкционной стали 45 с градиентной структурой упрочненной поверхности и достаточно дорогих и технологически сложных в получении современных износостойких покрытий, и материалов. Рассмотрен вопрос практического применения технологии ИКЭМО применительно к паре трения «ось спутника – спутник». Проведена оценка увеличения долговечности сопряжения «ось спутника – спутник» при реализации рассматриваемых методов обработки и заводской технологии. Представлены рекомендации к применению технологии комбинированной электромеханической обработки на машиностроительных предприятиях в качестве высокоэффективного способа обеспечения и повышения эксплуатационных показателей деталей машин на стадии их изготовления.

**Ключевые слова:** поверхностный слой, износостойкость, электромеханическая обработка, упрочнение, карбид вольфрама, качество поверхностного слоя, триботехнические испытания

**Для цитирования:** Горленко А.О., Шевцов М.Ю. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 12–21. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-21

## Wear resistance increase in cylindrical frictional interface using combined electromechanical processing

Alexander O. Gorlenko<sup>1</sup>, D. Eng.

Mikhail Yu. Shevtsov<sup>2</sup>, PhD student

<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> bugi12@bk.ru

<sup>2</sup> mih09mmo@yandex.ru

**Abstract.** Processing technology and technological equipment for the formation of a wear-resistant surface layer by implanting materials based on tungsten carbide (WC), are viewed. The effect of implanted WC powder on the formation of gradient wear-resistant structures in the friction surface of carbon steel formed during the implementation of combined electromechanical processing (WRCEMP) technology, has been studied. Resulting from heat and pressure impact in the zone of plastic deformation, intensive austenization of steel occurs with dissolution of WC powder and subsequent formation of highly dispersed composite structures caused by the decomposition of undercooled tungsten-supersaturated austenite. Combined comparative friction and wear tests were carried out for structural steel 45 with a graded structure of a hardened surface and rather expensive and technologically- difficult to obtain modern wear-resistant coatings and materials. The issue of WRCEMP technology practical application used for the «axis of satellite – satellite» friction pair is viewed. An assessment of the durability increase of the «axis of satellite – satellite» interface during the implementation

*of the considered processing methods and innovative technology was taken. Recommendations for the use of combined electromechanical processing technology at machine-building enterprises as a highly effective way to ensure and improve the performance of machine parts at the stage of their manufacture are given.*

**Keywords:** surface layer, wear resistance, electromechanical processing, hardening, WC, surface layer quality, tribotechnical tests

**For citation:** Gorlenko A.O., Shevtsov M.Yu. Wear resistance increase in cylindrical frictional interface using combined electromechanical processing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 3 (153). P. 12–21. doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-21

## **Введение**

Повышение износостойкости деталей машин, является главной проблемой, для всех областей техники. Повышение надежности машин и механизмов, безотказность и безопасность их работы, повышение эксплуатационных показателей, все это напрямую зависит от износостойкости деталей и узлов машин.

Параметры качества поверхностных слоев (макроотклонений, волнистости, шероховатости, физико-механических свойств) напрямую влияют на повышение эксплуатационных характеристик деталей. Режимы эксплуатации, повышенные нагрузки, скорости относительного перемещения являются основными факторами, влияющими на износ поверхности.

При наличии вышеуказанных факторов существует необходимость в изучении и поиске новых технологических решений повышения износостойкости поверхностного слоя.

Использование дефицитных и дорогих конструкционных материалов во всем объеме изделия нецелесообразно, поэтому экономически обосновано использовать материалы со специальными покрытиями или измененным поверхностным слоем, обеспечивающими нужный комплекс свойств. Наиболее перспективным подходом в укрепляюще-отделочной обработке является использование методов, которые позволяют расширить возможности улучшения качества поверхностных слоев контактирующих цилиндрических поверхностей. Это необходимо для обеспечения минимального износа и поддержания закономерных изменений в качестве поверхности. Карбиды вольфрама W<sub>2</sub>C и WC широко применяются для создания разнообразных функциональных материалов. Эти карбиды обладают высокой твердостью, износостойкостью и тугоплавкостью, что делает их идеальным выбором для

разработки износостойких и жаропрочных сплавов.

Цель данного исследования заключается в выявлении прямой связи между износостойкостью цилиндрических поверхностей трения и условиями комбинированной электро-механической обработки. Это позволит лучше понять, какие параметры и процессы влияют на износостойкость поверхностей и как можно оптимизировать эти процессы для повышения долговечности материалов. Дополнительно, важно учитывать, что использование упрочняюще-отделочной обработки не только повышает износостойкость, но также способствует улучшению других характеристик материалов, таких как прочность и стойкость к коррозии. Это открывает новые возможности для создания более долговечных и эффективных материалов для различных промышленных применений. Таким образом, исследования в области упрочняюще-отделочной обработки и применения карбидов вольфрама играют важную роль в развитии новых технологий и материалов, способствуя повышению эффективности производства и улучшению качества конечных продуктов.

## **Основное содержание и результаты работы**

Перед проведением экспериментальных исследований были подготовлены образцы и приборы. Технология комбинированной электро-механической обработки (ИКЭМО) применяется в специальных, сложных технических установках, в состав которых входят: универсальный станок (используется для обработки рабочих машин) с соответствующими инструментами и устройствами для защиты обрабатываемой детали и подачи электроэнергии; высокий ток и низкое напряжение; промышленный блок преобразования энергии; блок управления режимом обработки; способы

замены и оказания помощи в охлаждении топлива; блок интерфейса ПК. Детали вне цилиндрических поверхностей трения (валы, оси, втулки, ролики, поршни) преимущественно изготавливают из конструкционных сталей и сплавов, к которым предъявляются следующие требования: высокая прочность, экономичность, низкая чувствительность к концентрации напряжений и способность справляться с термической обработкой. Одной из наиболее часто используемых сталей для таких деталей является сталь 45.

Нанесение карбидов вольфрама на поверхность при электромеханической обработке [1, 2] осуществляется определенными способами. Перед обработкой на поверхность наносят покрытие, предварительно смешанное в определенной пропорции с нелетучим графитовым смазочным материалом на основе литиевого мыла. При установке карбида вольфрама применялись следующие способы обработки: выходной ток 0,9 кА; напряжение 2,6 В; напряжение, создаваемое на поверхности детали, составляет 100 Н/мм<sup>2</sup>.

Процесс имплантации показан на рис. 3. Частицы карбида вольфрама внедряются в образовавшийся верхний слой, укрепляя его. Затем там же в интенсивных режимах проводят электромеханическую обработку (ЭМО) (рис. 1).

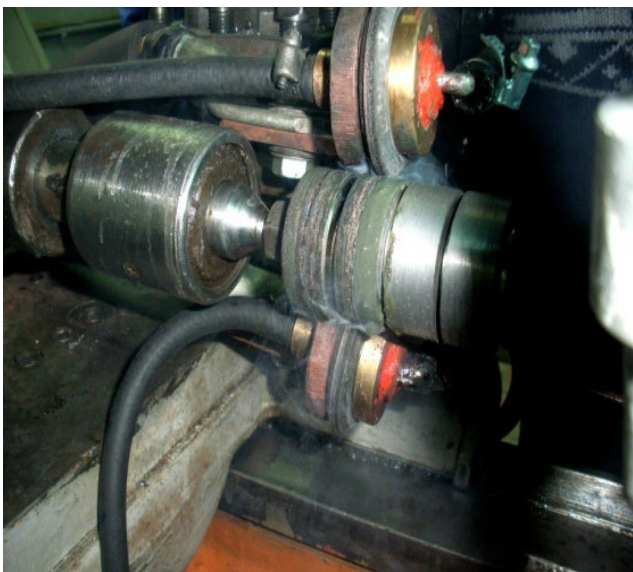


Рис. 1. Процесс имплантирования карбида вольфрама

Fig. 1. The process of WC implantation

При ЭМО были использованы следующие режимы: сила тока 1,4 кА; напряжение 2,9 В; давление, создаваемое на поверхности детали 110 Н/мм<sup>2</sup>. Эффект упрочнения при ЭМО достигается благодаря тому, что реализуются высокие скорости нагрева и охлаждения, и достигается высокая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [3, 4].



Рис. 2. Упрочнение при электромеханической обработке

Fig. 2. Hardening during electromechanical processing

В результате проведения эксперимента установлено, что при комбинированной электромеханической обработке после проведения конечных измерений, диаметр образца остается в пределах поля допуска.

В результате обработки на поверхности формируется трехслойная градиентная структура, состоящая из упрочненного слоя толщиной 180...220 мкм (рис. 3, слой 1), первого нижнего подслоя толщиной 200...250 мкм (рис. 3, слой 2), второго нижнего подслоя толщиной 20...40 мкм (рис. 3, слой 3) и матрицы, состоящей из нормализованной стали 45.

Слой 2 (см. рис. 3) представляет собой слабонасыщенный вольфрамом феррит, по границам зерен которого выделяется сетка карбида вольфрама. Следовательно, в процессе имплантирования и упрочнения, в слое 2 выделяется максимальное количество энергии, которое переводит систему в метастабильное

состояние с последующим образованием ячеистой структуры, что показано на рис. 4 (сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен).



Рис. 3. Структура поверхности стального образца, упрочненного карбидом вольфрама,  $\times 100$

Fig. 3. Surface structure of a steel sample hardened with WC,  $\times 100$

Данные ячеистые структуры имеют ярко выраженное эвтектическое строение, однако, сетка состоит из нитевидных кристаллов карбида вольфрама, чередующихся с изолированными глобулярными высокодисперсными частичками карбида вольфрама (менее 1,0 мкм). Причем, сами нити эвтектической сетки состоят из коагулировавших дисперсных глобулей карбида вольфрама, образуя в целом, единую композиционную структуру.

В соответствии с известной диаграммой Fe – W, температура слоя 2 в процессе обработки превышает температуру 1060 °С, соответствующую перитектоидной реакции. В этих

температурных условиях протекает полиморфное превращение железа с образованием аустенита и растворением карбида вольфрама в аустените.

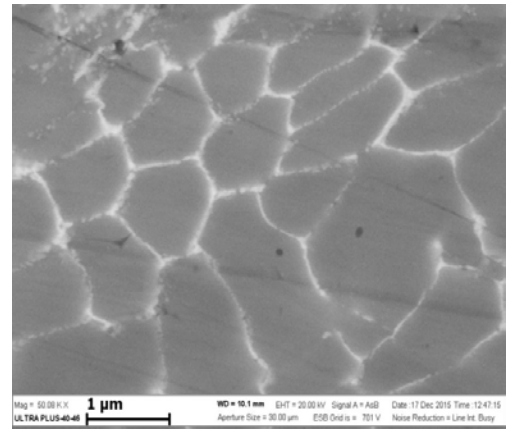


Рис. 4. Ячеистая структура переохлажденного аустенита в слое 2,  $\times 50800$

Fig. 4. Cellular structure of undercooled austenite in layer 2,  $\times 50800$

Микротвердость по Виккерсу измерялась на микротвердомере мод. ПМТ-3М. Измерение диагоналей отпечатков проводилось на микроскопе металлографическом инвертированном мод. Метам ЛВ-34 с применением автоматизированной системы анализа «Микро-Анализ View». Значениям микротвердости по Виккерсу для многослойной упрочненной градиентной структуры износостойкой поверхности приведены в табл. 1.

## 1. Микротвердость поверхностного слоя стали 45, упрочненного карбидом вольфрама

### 1. Microhardness of the surface layer of 45 steel reinforced with tungsten carbide (WC)

Микротвердость слоев HV, МПа			
Слой 1	Слой 2	Слой 3	Матрица
741...846	546...633	431...525	304...332

Для определения триботехнических показателей были проведены комплексные сравнительные испытания на трение и изнашивание конструкционной стали 45 с градиентной структурой упрочненной поверхности и достаточно дорогих и технологически сложных в

получении современных износостойких покрытий, и материалов.

Для комплексных сравнительных испытаний износостойкости исследовались наружные цилиндрические поверхности образцов, изготовленных из сталей P18 и 45.



Комплексные сравнительные испытания образцов в условиях граничной смазки проводились на автоматизированной установке, созданной на базе машины трения МИ-1М, нормализованным методом с использованием нагружающего устройства оригинальной конструкции [5].

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели триботехнических свойств: время приработки  $t_0$ , ч; приработочный износ  $h_0$ , мкм; среднее значение коэффициента трения в период нормального изнашивания  $f$ ; отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки  $f_0$  к  $f$ ; среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания  $I_h = (h - h_0) / (L - L_0)$ , где  $h$  – суммарная величина износа образца за время испытаний, мкм;  $L$  – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, мкм;  $L_0$  – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки; значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний  $I_{h\Sigma} = h / L$ .

Испытания образцов проводились при следующих условиях: скорость скольжения  $v = 1,0$  м/с; нормальная сила нагружения  $N = 100 \pm 0,5$  %, Н (соответствует давлению, рассчитанному по Герцу, порядка 150 МПа); вид первоначального контакта – пластический

насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И – 20А (ГОСТ 20799-88); материал индентора – твердый сплав ВК8; общее время испытаний каждого образца – 6,0 ч.

Результаты испытаний образцов, обработанных с применением вышеописанных технологий на модернизированной установке МИ-1М представлены в табл. 2.

На рис. 5 в качестве примера приведены результаты испытаний образца с графиками изменения износа и коэффициента трения в режиме реального времени для стали 45, обработанной методом ИКЭМО. Сравнение результатов триботехнических испытаний образцов нормализованным методом показало, что минимальными значениями коэффициента трения, времени приработки и износа обладает сталь 45 с градиентной структурой поверхностного слоя с имплантированными карбидами вольфрама и последующим электромеханическим упрочнением. Кривые износа для образцов стали Р18 и с покрытиями систем Ti-Al-N и Mo-Cr-N характеризуются ускоренным ростом износа после износа покрытия. Кривая износа для образца стали 45 после ИКЭМО более стабильна.

## 2. Результаты триботехнических испытаний на модернизированной установке МИ-1М

### 2. Results of tribotechnical testson the upgraded MI-1M installation

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для образца				
		Сталь Р18	Сталь Р18 + Ti-Al-N	Сталь Р18 + Mo-Cr-N	Сталь 45 + ИКЭМО	Сталь 45 + ЭМО
Прирабатываемость	$t_0$ , ч	1,12	0,58	0,75	0,45	2,93
	$h_0$ , мкм	7,50	1,30	1,50	1,70	6,00
	$f_0/f$	1,61	1,42	1,46	1,19	2,94
Антифрикционность	$f$	0,31	0,32	0,25	0,24	0,17
Износостойкость	$h$ , мкм	16,1	9,70	9,60	4,6	7,50
	$I_h \cdot 10^{-10}$	3,44	3,12	3,09	1,44	0,82
	$I_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	5,55	3,35	3,32	2,03	2,59

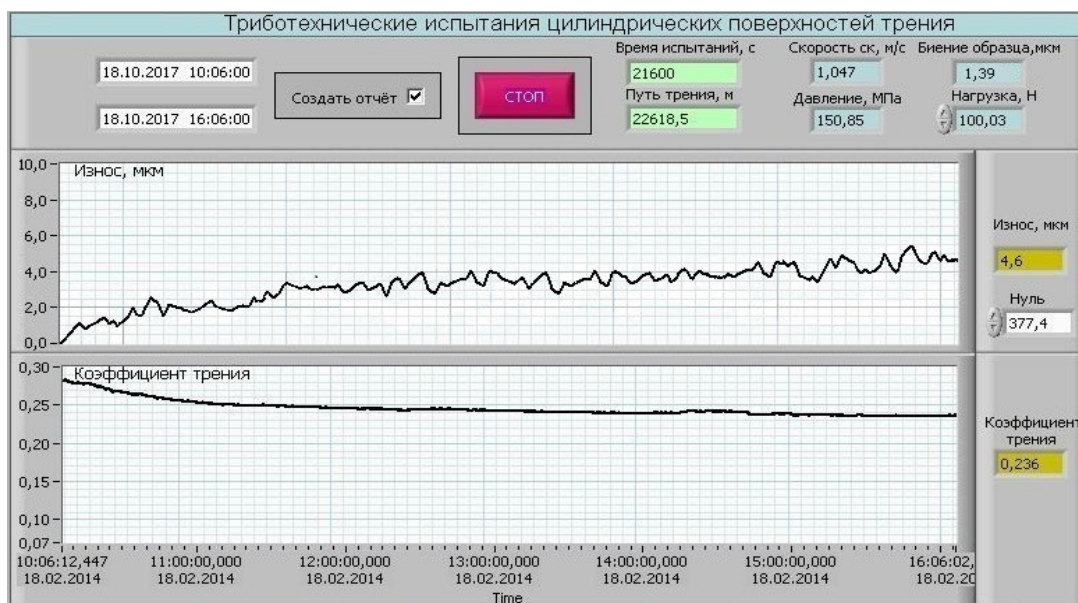


Рис. 5. Результаты испытаний образца стали 45 после формирования имплантированного карбидами вольфрама слоя и последующего электро-механического упрочнения (ИКЭМО)

Fig. 5. Test results of the 45 steel sample after the formation of a layer implanted with WC and subsequent electro-mechanical hardening (WRCEMP)

По результатам триботехнических испытаний установлено, что интенсивность изнашивания поверхности трения образцов стали 45 с градиентной структурой поверхностного слоя после имплантирования карбидами вольфрама и последующим электро-механическим упрочнением в период нормального изнашивания меньше по сравнению (в скобках указаны значения для общего времени испытаний):

- с термообработанными образцами – в 2,4 (2,7) раза;
- с образцами после PVD (покрытие системы Ti-Al-N) – в 2,2 (1,7) раза;
- с образцами после PVD (покрытие системы Mo-Cr-N) – в 2,1 (1,6) раза.

Таким образом, высокие показатели износостойкости градиентной структуры поверхностного слоя стали 45 с имплантированными карбидами вольфрама являются следствием композиционного упрочнения за счет формирования высокодисперсных карбидных структур на основе карбида вольфрама (менее 1,0 мкм) различной морфологии (ячеистая сетка, нить, зерно) и как следствие, более высокие значения микротвердости.

### Технологические возможности и рекомендации по применению технологии ИКЭМО

Технология ЭМО основана на сочетании термического и силового воздействий, что приводит к изменению физико-механических и микрогеометрических показателей поверхностного слоя деталей, изготовленных из средне-, высокоуглеродистых, легированных сталей и высокопрочного чугуна (повышению твердости и прочности, снижению высотных параметров шероховатости и т. д.), позволяет повысить (в 1,5 – 3,0 раза) эксплуатационные показатели обрабатываемых деталей (износостойкость, контактную жесткость и прочность, предел выносливости, теплостойкость, фреттингостойкость). Технологическая оснастка, состоящая из двухроликовой головки, закрепляемой в резцедержателе, и средств коммутации, позволяет использовать технологию ЭМО мобильно в совокупности с любым токарным станком.

К улучшенным показателям ЭМО относятся: электробезопасность; материало- и энергоёмкость; мобильность и удобство эксплуатации; диапазон регулирования режимов обработки (плотности тока, скорости

обработки, давления инструмента); выходные параметры процесса ЭМО (параметры микрогеометрии поверхности детали, физико-механические свойства, глубина упрочнения и др.).

Метод ИКЭМО может применяться для цилиндрических и сферических ответственных деталей автомобилей, а так же для ходовых винтов станков, глобоидных червяков рулевого управления автомобиля, цилиндрических и конических резьбовых соединений (с метрической и трубной резьбой); вырубных пуансонов; поверхностей деталей, образованных металлизацией, напылением, нанесением покрытий, наплавкой, наваркой.

Эффективно применение технологии ИКЭМО таких деталей, работающих в

условиях фреттинг-коррозии, как сопряжения «вал – подшипник качения», «корпусная деталь – подшипник качения», где происходят относительные микроперемещения вследствие вибраций и приложения ударных нагрузок в процессе эксплуатации машин. Таким же воздействием подвергаются детали автотракторных, строительных и горных машин.

Применение результатов исследования к паре трения «сателлит – ось сателлита».

Сателлит изготавливается из стали 35ХМНЛ с 580 НV<sub>исх</sub> (после механических операций зубообработки и цементации), ось сателлита редуктора моста шасси БАЗ изготавливается из стали Л30 с 450 НV и имеет крестообразную форму рис. 6.



Рис. 6. Применение технологии ИКЭМО для повышения износостойкости узла трения «сателлит – ось сателлита»

Fig. 6. Application of WRCEMP technology to increase the wear resistance of the friction unit «axis of satellite – satellite»

Сталь Л30 была заменена сталью 45Х с изменением конфигурации детали на разъемные две оси (рис. 7) и изготовлен опытный образец оси сателлита. После чего производилось имплантирование материалов на основе карбида вольфрама с последующей электрохимической обработкой в соответствии с методологией проведения исследований.

Проводились сравнительные испытания износостойкости пары трения «ось сателлита – сателлит». В качестве технологических методов обработки цилиндрической поверхности рассматривались оригинальная технология изготовления оси сателлита.



Рис. 7. Ось сателлита дифференциала

Fig. 7. Differential satellite axis

### 3. Параметры качества поверхностного слоя деталей дифференциала моста

#### 3. Quality parameters of the surface layer of the differential parts of the bridge

Деталь пары трения и метод ее упрочнения	Параметры качества поверхностного слоя				
	$Ra$ , мкм	$Rp$ , мкм	$Rmax$ , мкм	$Sm$ , мкм	$tm$ , %
Ось сателлита (заводской вариант)	1,6	4,9	8,8	40	52
Ось сателлита с ИКЭМО	1,4	4,3	11	139	54

Параметры качества поверхностного слоя деталей данной пары трения после обработки представлены в табл. 3, а результаты сравнительных испытаний износостойкости – на рис. 8.

Результаты испытаний показывают, что при ИКЭМО с закономерным изменением плотности тока износ цилиндрической поверхности является минимальным и практически равномерным.

Произведем оценку относительного увеличения долговечности данного сопряжения при реализации рассматриваемых методов обработки (рис. 9) по сравнению с заводским вариантом.

Относительный нормальный износ:

$$W = W / [\tilde{W}],$$

где  $[W]$  – величина допустимого износа сопряжения.

Тогда  $\tilde{W} = 1,0$  при  $W = [W]$ .

Относительный ресурс работы до достижения допустимого износа пары трения:

$$\tilde{t}_i = 1 / \tilde{J}_{ti},$$

где  $J_{ti} = J_{ti} / J_{t4}$ .

Значение относительного ресурса работы сопряжения до достижения допустимого износа представлено на рис. 8, из которого следуют значения  $\tilde{W}$ ,  $\tilde{t}_i$  – соответственно относительные величины допустимого износа и ресурса пары трения. Пробег автомобиля до замены дифференциала относительного увеличения долговечности при реализации рассматриваемого метода обработки по сравнению с заводским вариантом:  $\tilde{t}_3 / \tilde{t}_i = 1,79$  раза.

Пробег автомобиля до замены дифференциала примерно составляет 60 тыс. км. Из рис. 8 видно, что при ИКЭМО пробег шасси до

замены дифференциала составит 107,4 тыс. км, что соответствует повышению долговечности почти в два раза.

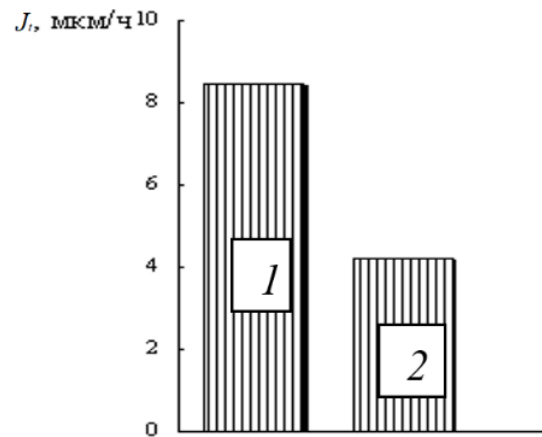


Рис. 8. Суммарная скорость изнашивания сопряженных сфер пары трения «ось сателлита – чашка корпуса дифференциала»: 1 – заводской вариант; 2 – ИКЭМО

Fig. 8. The total wear rate of the connected spheres of the friction pair «satellite axis – differential housing cup»: 1 – factory version; 2 – WRCEMP

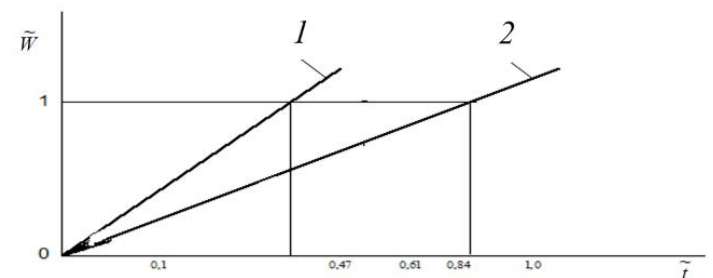


Рис. 9. Относительное увеличение долговечности и ресурса пары трения «ось сателлита – сателлит»: 1 – заводской вариант; 2 – ИКЭМО

Fig. 9. Relative increase in the durability and resource of the «axis of satellite–satellite» friction pair: 1 – factory version; 2 – WRCEMP

## Выводы

1. Технология комбинированной электро-механической обработки, включающая формирование слоев, имплантированных карбидами вольфрама, с последующим электромеханическим упрочнением обрабатываемой поверхности (ИКЭМО), основана на сочетании термического и силового воздействий на поверхность обрабатываемой детали, что приводит к улучшению физико-механических и микрогеометрических показателей качества поверхностного слоя (повышению твердости и прочности, уменьшению высотных параметров шероховатости и т. д.) и, как следствие, к повышению эксплуатационных показателей деталей, в частности износостойкости, контактной жесткости и прочности, предела выносливости, теплостойкости, фреттингостойкости.

2. Снижение интенсивности изнашивания обрабатываемых ответственных деталей приводит к повышению их ресурса и соответственно надежности.

3. Модификация поверхности трения стали за счет образования на ней поверхностного слоя, имплантированного и композиционно упрочненного карбидами вольфрама, наряду с формированием подслоя, состоящего из ячеистого переохлажденного аустенита, стабилизированного вольфрамом и армированного сеткой из карбида вольфрама, состоящей из агрегатированных наноразмерных частиц карбида вольфрама методом ИКЭМО позволяет существенно повысить износостойкость поверхностей трения, что подтверждается триботехническими испытаниями.

4. Наличие многослойной структуры, имеющей общую металлическую матрицу основы материала, обеспечивает монолитную сцепляемость упрочненных слоев без нарушения сплошности в процессе изнашивания при значительных динамических нагрузках, что также подтверждается триботехническими испытаниями.

5. Применение данной технологии возможно на машиностроительных предприятиях в качестве высокоэффективного способа обеспечения и повышения эксплуатационных показателей деталей машин на стадии их изготовления.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горленко А.О., Давыдов С.В. Технология создания износостойких поверхностных слоев с имплантированными материалами на основе карбида вольфрама. Справочник // Инженерный журнал. 2017. № 1 (238). С. 3–10.

2. Горленко А.О., Давыдов С.В. Технология имплантации материалов на основе карбида вольфрама с целью повышения износостойкости поверхностей трения // Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. № 9 (63). С. 3–9.

3. Горленко А.О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электромеханической обработке // Вестн. БГТУ. 2011. № 3. С. 4–8.

4. Gorlenko A.O., Shevtsov M.Y. Improving technology combined electromechanical processing // Journal of Advanced Research in Technical Science. North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2018. Issue 9-1. pp. 56–61.

5. Горленко А.О., Прудников М.И. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом // Справочник. Инженерный журнал. Прил. 10. 2009. С. 22–24.

6. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

7. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.

8. Давыдов С.В., Горленко А.О., Шевцов М.Ю. Износостойкая поверхность трения углеродистой стали, упрочненная порошком карбида вольфрама // Технология машиностроения и материаловедение: материалы Междунар. науч.-практ. Конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. № 1. С. 71–80.

9. Горленко А.О., Шевцов М.Ю. Повышение износостойкости деталей машин имплантацией материалов на основе карбида вольфрама // Молодежь и системная модернизация страны: Сб. науч. статей 2-й Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых в 4 т. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. Т. 4. С. 129–134.

10. Горленко А.О., Давыдов С.В. Технология создания износостойких поверхностных слоев с имплантированными материалами на основе карбида вольфрама. Справочник // Инженерный журнал. 2017. № 1 (238). С. 3–10.

11. Горленко А.О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электромеханической обработке // Вестн. БГТУ. 2011. № 3. С. 4–8.

## REFERENCES

1. Gorlenko A.O., Davydov S.V. Technology for creating wear-resistant surface layers with implanted materials based on tungsten carbide. Guide // Engineering magazine. 2017, No. 1 (238), pp. 3–10.

2. Gorlenko A.O., Davydov S.V. Technology of implanting materials based on tungsten carbide for increasing wear resistance of frictional surfaces // Science intensive

technologies in mechanical engineering. 2016, No. 9 (63), pp. 3–9.

3. Gorlenko A.O. Hardening of frictional surfaces of machine parts under electromechanical processing // Vestnik of BSTU, 2011, No. 3, pp. 4–8.

4. Gorlenko A.O., Shevtsov M.Y. Improving technology combined electromechanical processing // Journal of Advanced Research in Technical Science. North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2018. Issue 9-1. pp. 56–61.

5. Gorlenko A.O., Prudnikov M.I. Tribotechnical testing of machine element surfaces by a normalized method // Guide. Engineering magazine. Supplement 10, 2009, pp. 22–24.

6. Suslov, A.G. The Quality of surface layer of machine parts, Moscow: Mashinostoenie, 2000, 320 p.

7. Suslov A.G. Technological support of parameters of the state of the surface layer of parts. Moscow: Mashinostoenie, 1987, 208 p.

8. Davydov S.V., Gorlenko A.O., Shevtsov M.Yu. Wear-resistant frictional surface of carbon steel, hardened

with tungsten carbide (WC) powder // Technology of mechanical engineering and materials science: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Novokuznetsk: SRC MB, 2017. No. 1. pp. 71–80.

9. Gorlenko A.O., Shevtsov M.Yu. Wear resistance increase for machine parts by implanting materials based on tungsten carbide // Youth and systemic modernization of the country: Collection of scientific articles, proceedings of the 2nd International Scientific Conference of Students and Young Researchers in 4 vols. Kursk: CJSC «University Book», 2017, vol. 4, pp. 129–134.

10. Gorlenko A.O., Davydov S.V. Technology for creating wear-resistant surface layers with implanted materials based on tungsten carbide. Guide // Engineering magazine, 2017, No. 1 (238), pp. 3–10.

11. Gorlenko A.O. Hardening of frictional surfaces of machine parts under electromechanical processing // Vestnik of BSTU, 2011, No. 3, pp. 4–8.

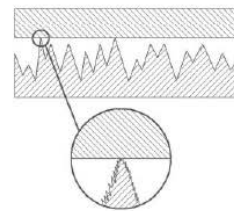
***Вклад авторов:*** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 07.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 27.02.2024.

The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; assepted for publication 27.02.2024.





Научная статья

УДК 621.892.5

doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-22-30

## Влияние микроорганизмов и геомодификатора трения на трибологические свойства консистентных смазочных материалов

Денис Викторович Зимин<sup>1</sup>, аспирант

Александр Джалюльевич Бреки<sup>2</sup>, д.т.н.

Николай Евгеньевич Стариков<sup>3</sup>, д.т.н.

Денис Олегович Селифонтов<sup>4</sup>, аспирант

Сергей Александрович Семенов<sup>5</sup>, д.т.н.

Елена Борисовна Седакова<sup>6</sup>, д.т.н.

<sup>1,2</sup> Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2,6</sup> Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3,4</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>5</sup> ФГБУ ЦНИИ ВВС МО РФ, Люберцы, Россия

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

<sup>2</sup> albreki@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4452-3896>

<sup>3</sup> starikov\_tai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>4</sup> denis-selifontov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>5</sup> semenov1954@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>6</sup> elenasedakova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8259-2606>

**Аннотация.** Процессы изнашивания деталей всегда сопровождают работу машин и механизмов. Важной задачей является минимизация потерь энергии на трение, для чего используются смазочные материалы, которые, в свою очередь, могут содержать различные дисперсные компоненты. Эти компоненты подразделяются на три группы: образующиеся в процессе трения, попадающие в узел трения извне и целенаправленно добавляемые. В работе подробно изучается влияние таких дисперсных компонентов, как микроорганизмы (микроскопические плесневые грибы) и целенаправленно добавляемые наполнители, в частности, серпентинит, на процессы трения и изнашивания. Рассмотрены условия возникновения и механизм биоповреждений, а также токсины, выделяемые микроорганизмами. Приведена структура и принцип действия серпентинита. Для выполнения испытаний применялись консистентные смазочные материалы четырёх разных марок (Лита, ЦИАТИМ-201, ГОИ-54п и МС-70), а также образцы зараженных плесневыми грибами консистентных смазочных материалов в чашках Петри и мелкодисперсный порошок серпентинита. Трибологические испытания проводились на машине Bosch PBD-40, а диаметры пятен износа шариков, находящихся в узле трения, измерялись при помощи цифрового микроскопа DigiMicro 2.0. В результате проведённых испытаний было найдено, что при использовании в узле трения заражённых микроорганизмами консистентных смазочных материалов чаще всего наблюдалось ухудшение таких триботехнических характеристик, как средняя сила трения и средний диаметр пятна износа, по сравнению с базовыми смазками. А при использовании смазочной композиции, состоящей из заражённого смазочного материала и серпентинита, всегда наблюдалось улучшение данных триботехнических показателей по сравнению с заражёнными консистентными смазками, не содержащими серпентинит, что указывает на эффективность добавления наполнителя.

**Ключевые слова:** консистентный смазочный материал, дисперсные компоненты, микроорганизмы, серпентинит

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FFNF-2024-0002 «Механика и термодинамика материалов с микро- и наноструктурой, претерпевающих фазовые и химические превращения при механических и физико-химических воздействиях».

**Для цитирования:** Зимин Д.В., Бреки А.Д., Стариков Н.Е., Селифонтов Д.О., Семенов С.А., Седакова Е.Б. Влияние микроорганизмов и геомодификатора трения на трибологические свойства консистентных смазочных материалов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 22–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30

## Microorganisms effect and friction geomodifier influence on the tribological properties of grease lubricants

Denis V. Zimin<sup>1</sup>, PhD student

Alexander D. Breki<sup>2</sup>, D. Eng.

Nikolai E. Starikov<sup>3</sup>, D. Eng.

Denis O. Selifontov<sup>4</sup>, PhD student

Sergey A. Semenov<sup>5</sup>, D. Eng.

Elena B. Sedakova<sup>6</sup>, D. Eng.

<sup>1, 2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>2, 6</sup> Institute for Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

<sup>3, 4</sup> Tula State University, Tula, Russia

<sup>5</sup> FSBI Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Lyubertsy, Russia

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

<sup>2</sup> albreki@yandex.ru

<sup>3</sup> starikov\_taii@mail.ru

<sup>4</sup> denis-selifontov@mail.ru

<sup>5</sup> semenov1954@mail.ru

<sup>6</sup> elenasedakova@gmail.com

**Abstract.** Parts wear process always associates with the operation of machines and mechanisms. An important task is to minimize friction energy losses, and it is lubricants that are used for that, which, in turn, can contain various dispersed components. These components are divided into three groups: being formed during the friction process, some entering friction units from the outside and others, being purposefully added. The paper studies in detail the influence of such dispersed components as microorganisms (microscopic mold fungi) and purposefully added fillers, in particular, serpentinite, on the processes of friction and wear. The conditions of occurrence and mechanism of biological damage, as well as toxins released by microorganisms are viewed. The structure and principle of action of serpentinite are given. To perform the tests, four different brands of greases were used (Lita, TSIATIM-201, GOI-54p and MS-70), as well as samples of lubricants with mycotic molds lesion in Petri dishes and fine serpentinite powder. Tribological tests were carried out on a Bosch PBD-40 machine, and the diameters of wear spots of the balls located in the friction unit were measured using a DigiMicro 2.0 digital microscope. As a result of conducted tests, it was found that in case of using greases with mold fungi in the friction unit, deterioration of tribotechnical characteristics such as average friction force and mean diameter of the wear spot was most often observed as compared to basic lubricants. And when using a lubricant composition consisting of contaminated lubricant and serpentinite, there has always been an improvement in these tribotechnical indicators as compared to contaminated greases without serpentinite, so it proves the effectiveness of filler addition.

**Keywords:** grease, dispersed components, microorganisms, serpentinite

**Acknowledgements:** the work is performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FFNF-2024-0002 «Mechanics and thermodynamics of materials with micro- and nanostructure undergoing phase and chemical transformations under mechanical and physico-chemical impacts».

**For citation:** Zimin D.V., Breki A.D., Starikov N.E., Selifontov D.O., Semenov S.A., Sedakova E.B. Microorganisms effect and friction geomodifier influence on the tribological properties of grease lubricants / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 3 (153). P. 22–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30



**Введение**

Развитие современных машин сопровождается увеличением количества трибосопряжений, элементы которых изнашиваются, что способствует увеличению потерь энергии на трение, а также снижению надёжности и долговечности машин. Дополнительным фактором, обуславливающим повышение износа пар трения, является рост нагрузок и скоростей. В связи с этим актуальной трибологической задачей является снижение потерь на трение.

С целью решения этой задачи применяются консистентные смазочные материалы (КСМ) – полутвёрдый продукт, состоящий из масла и загустителя. Используемое масло может быть минеральным или синтетическим, а в качестве загустителя чаще всего используются мыла. Масло является главной составляющей КСМ (70...90 %), а введённый в него загуститель (10...25 %) формирует так называемый «пространственный скелет». В ячейках этого «скелета» находится масло, подобно мёду в сотах [1]. При наличии внешнего воздействия смазка течёт в результате пластической деформации. После окончания воздействия смазка со временем приходит в исходное состояние, возвращаясь к первоначальной структуре.

Во время работы узла трения в смазочном материале образуются различные

дисперсные компоненты, классификация которых представлена на схеме (рис. 1). Их можно разделить на три большие группы: дисперсные компоненты, образующиеся в процессе трения (продукты износа и окисления); дисперсные компоненты, попадающие в узел трения извне (пыль, песок, микроорганизмы); дисперсные компоненты, целенаправленно добавляемые в узел трения (порошки твёрдых смазочных материалов, сульфидов и т. д.) [2].

Рассмотрим подробнее микроорганизмы и целенаправленно добавляемые наполнители. Изучение воздействия биофактора на смазочные материалы актуально, потому что его влияние изучено куда меньше, чем воздействие иных факторов, таких как температура и агрессивные среды [3].

Биологическое повреждение объекта – это постепенное разрушение изделия, происходящее под воздействием микроорганизмов. Существует ряд условий, выполнение которых повышает вероятность биоповреждений смазочных масел. К таким условиям можно отнести комфортную температуру, высокую влажность и присутствие загрязнений. Установлено, что микроскопические грибы и бактерии могут усваивать углеводороды, т. к. при увеличении количества исследуемого масла увеличивалось также и число бактерий [4].



Рис. 1. Классификация дисперсных компонентов [2]

Fig. 1. Classification of dispersed components [2]

Возникновение микробиологического повреждения можно описать процессом, протекающим в несколько стадий. Сначала микроорганизмы попадают на поверхность материала и поглощаются им, затем происходит заметное увеличение их численности и химическое воздействие продуктов жизнедеятельности микроорганизмов на материал, наконец, развивается коррозионный процесс (биокоррозия) и происходит усиление биоповреждений из-за взаимодействия различных групп микроорганизмов [5].

Микробиологическая стойкость – это показатель неизменности свойств объекта под воздействием микроорганизмов с течением времени. Смазочный материал должен быть биостойким, потому что в ходе эксплуатации машины детали механизма могут быть подвержены биокоррозией вследствие попадания микроорганизмов. Но в ходе исследований [6, 7] было определено, что ни масло ружейное РЖ, ни КСМ «Лита» не являются грибостойкими. А для КСМ «Лита» было найдено, что введение грибов *Aspergillus niger* приводит к повышению нестабильности трения [7]. Эти результаты указывают на необходимость проведения дополнительных трибологических испытаний смазочных материалов, содержащих микроскопические грибы.

Использование микроорганизмами составляющих смазочных масел в качестве источника питания и энергии, а также выделение ими продуктов жизнедеятельности, как правило, приводит к ухудшению состояния смазочных материалов.

Микроскопические плесневые грибы выделяют так называемые микотоксины, т. е. метаболиты, наиболее токсичными из которых являются афлатоксины и охратоксины. Эти микроорганизмы встречаются повсюду и адаптированы к условиям окружающей среды, но при низкой температуре и относительной влажности меньше 15 % наблюдается низкая активность ферментов и почти не

происходит размножение микромицетов. Микроскопические грибы в виде плесени часто можно обнаружить на поверхности зерна, овощей и других растений. В ходе сбора урожая они могут попасть, например, в зазоры пар трения зерноуборочного комбайна и оказать негативное влияние на смазочные материалы, содержащиеся в этих трибосопряжениях [8].

С целью улучшения трибологических свойств смазочных материалов в них целенаправленно добавляются дисперсные компоненты. Например, актуальным является введение частиц такого природного слоистого геомодификатора трения, как серпентинит (рис. 2). Серпентинит (от лат. *Serpens* – змея) – горная порода, включающая в себя серпентин  $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$  в качестве базового элемента, составляющего не менее 50 % от общего объема породы, а также тальк и др. [9]. Тонкоплёночные покрытия, полученные с использованием частиц минералов слоистого строения, способствуют снижению потерь на трение за счёт разделения контактирующих поверхностей и сглаживания их микрорельефа [10].

Наряду с серпентинитом, существуют также и другие модификаторы трения в виде мелкодисперсных порошков. Это, например, графит, дисульфид молибдена, дисульфид вольфрама, диселенид вольфрама и др. [11, 12]. Такие наполнители обладают слоистой структурой и анизотропией свойств. Они могут применяться как антифрикционные добавки, которые заменяют трение соприкасающихся деталей трением слоёв молекул наполнителя. Как показывают результаты исследований, введение дисульфида вольфрама снижает момент трения на 10...40 %, а диселенида вольфрама – на 20...50 %, что демонстрирует эффективность добавок, используемых для защиты деталей узлов трения [11, 12].



Рис. 2. Серпентинит

Fig. 2. Serpentinite

Согласно результатам испытаний, проведённых на четырёхшариковой машине трения, при размере частиц серпентинита 1,0 мкм диаметр пятна износа меняется незначительно при низкой концентрации наполнителя, но заметно снижается при повышении концентрации наполнителя до 10 % масс. При использовании серпентинита с размером частиц 10 мкм диаметр пятна износа начинает уменьшаться даже при низкой концентрации и достигает наименьшего значения при концентрации наполнителя 7,0 % масс. [13].

Таким образом, был проведен обзор различных дисперсных компонентов, встречающихся в консистентных смазочных материалах, а также были подробно рассмотрены такие дисперсные компоненты, как микроорганизмы и целенаправленно добавляемые наполнители. Согласно проведенным исследованиям, смазочные материалы не грибостойки, а воздействие микроорганизмов на КСМ приводит к ухудшению стабильности такой важной трибологической характеристики, как сила трения. Соответственно, для выяснения того, окажет ли дисперсный наполнитель позитивное влияние на свойства КСМ, содержащих микроорганизмы, необходимо проведение соответствующих исследований.

## Материалы и методы

Для выполнения испытаний использованы КСМ различных марок (Лита, ЦИАТИМ-201, ГОИ-54п и МС-70), а также образцы заражённых КСМ в чашках Петри и мелкодисперсный порошок серпентинита. Испытания выполнены на машине трения Bosch PBD-40. Схема применяемого узла трения приведена на рис. 3. Согласно рис. 3, в емкость закладываются нижние шарики из стали ШХ15 и смазочный материал. Взвешивание материалов производилось на аналитических весах Госметр ВЛ-324В-С. Испытания проводились при частоте вращения 200 об/мин и нагрузке 20 кгс. Регистрация значений силы трения происходит каждую секунду в течение часа при помощи подключенного через USB-кабель компьютера с программным обеспечением Owen Process Manager, после чего полученные данные можно сохранить в виде файла формата Excel. Диаметры пятен износа нижних шариков были изменены при помощи цифрового микроскопа DigiMicro 2.0.

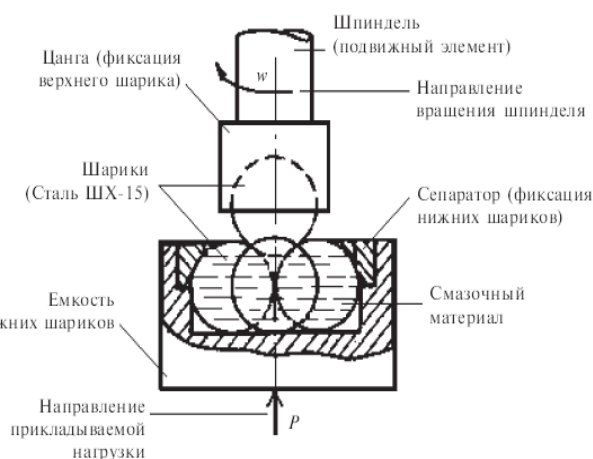


Рис. 3. Схема используемого узла трения [14]

Fig. 3. Scheme of the friction unit used [14]

## Результаты и обсуждение

Сначала были проведены испытания базовых консистентных смазочных материалов

(КСМ) для определения трибологических характеристик, таких как средний диаметр пятна износа и средняя сила трения.

Для того чтобы узнать, как влияют микроорганизмы на эти характеристики, были проведены испытания заражённых КСМ. Согласно полученным данным (рис. 4), наименьшим средним диаметром пятна износа, и соответственно, наилучшими противоизносными свойствами обладает КСМ ЦИАТИМ-201, а наименьшей средней силой трения, и соответственно, наилучшими антифрикционными свойствами – ГОИ-54п.

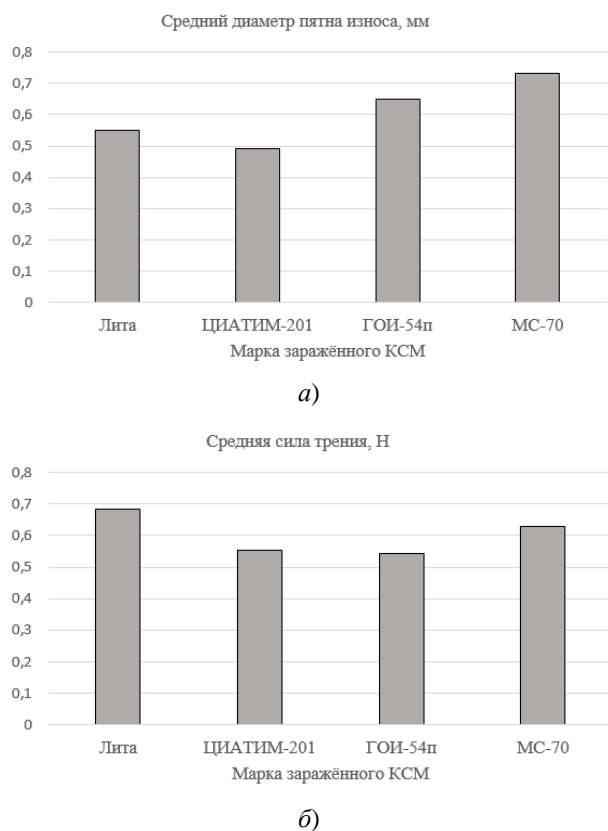


Рис. 4. Средний диаметр пятна износа (а) и сила трения (б) при использовании разных марок зараженных КСМ

Fig. 4. Average diameter of the wear spot (a) and friction force (b) when using different brands of contaminated fuels and lubricant

С целью нивелировать негативное воздействие микроорганизмов (микроскопических грибов и бактерий) в заражённые КСМ был добавлен дисперсный наполнитель –

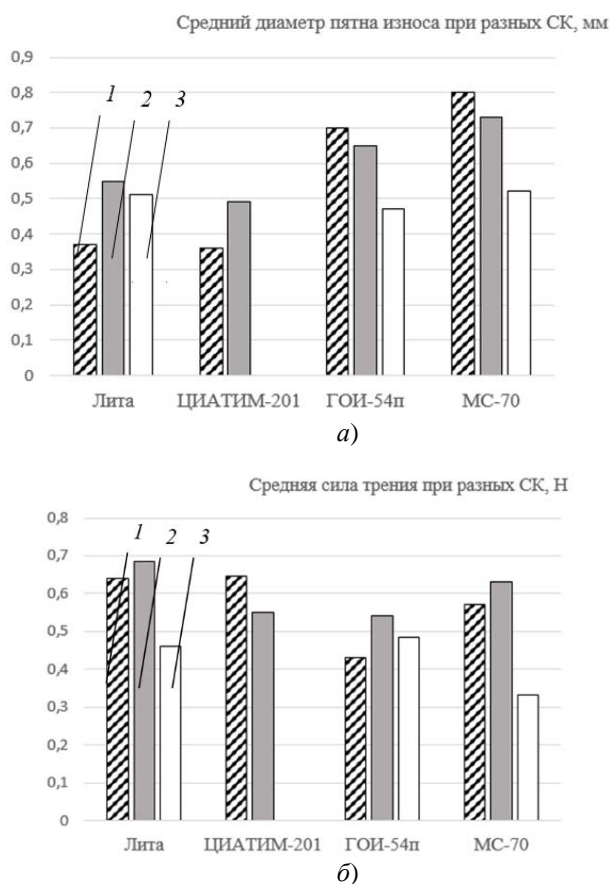
серпентинит. Для выявления оптимальной концентрации наполнителя был проведен ряд испытаний со смазочными композициями (СК), каждая из которых состояла из определённого базового КСМ и серпентинита с концентрацией 1,0 %, 2,0 % или 4,0 %.

Путем аппроксимации экспериментальных данных полиномом второй степени были получены графики зависимости таких трибологических характеристик, как средний диаметр пятна износа и средняя сила трения, от концентрации серпентинита.

С помощью этих графиков были подобраны оптимальные концентрации наполнителя: 2,0 % для КСМ Лита; 3,0 % для ГОИ-54п; 2,5 % для МС-70. Для КСМ ЦИАТИМ-201 было решено не проводить испытания СК, содержащей заражённый КСМ ЦИАТИМ-201 и серпентинит, т. к. данная добавка либо увеличивает средний диаметр пятна износа, либо никак не влияет на среднюю силу трения.

Результаты проведённых испытаний представлены на диаграммах (рис. 5).

Сначала рассмотрим изменение среднего диаметра пятна износа. При использовании заражённого КСМ Лита он возрастает на 49 % по сравнению с базовым КСМ Лита, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ Лита и серпентинита, снижается на 7,0 % по сравнению с заражённым КСМ Лита. При применении заражённого КСМ ЦИАТИМ-201 средний диаметр возрастает на 36 % по сравнению с базовым КСМ ЦИАТИМ-201. При использовании заражённого КСМ ГОИ-54п он снижается на 7,0 % по сравнению с базовым КСМ ГОИ-54п, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ, ГОИ-54п и серпентинита, снижается на 28 % по сравнению с заражённым КСМ ГОИ-54п. При применении заражённого КСМ МС-70 средний диаметр снижается на 9,0 % по сравнению с базовым КСМ МС-70, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ МС-70 и серпентинита, снижается на 29 % по сравнению с заражённым КСМ МС-70.



**Рис. 5.** Средний диаметр пятна износа (а) и сила трения (б) при использовании разных СК: 1 – базовые КСМ; 2 – зараженные КСМ; 3 – зараженные КСМ с серпентинитом

**Fig. 5.** Average diameter of the wear spot (a) and the friction force (b) when using different LC: 1 – basic grease; 2 – mold-infected grease; 3 – mold-infected grease with serpentine

Сначала рассмотрим изменение среднего диаметра пятна износа. При использовании заражённого КСМ Лита он возрастает на 49 % по сравнению с базовым КСМ Лита, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ Лита и серпентинита, снижается на 7,0 % по сравнению с заражённым КСМ Лита. При применении заражённого КСМ ЦИАТИМ-201 средний диаметр возрастает на 36 % по сравнению с базовым КСМ ЦИАТИМ-201. При использовании заражённого КСМ ГОИ-54п он снижается на 7,0 % по сравнению с базовым КСМ ГОИ-54п, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ, ГОИ-54п и серпентинита, снижается на 28 % по сравнению с заражённым

КСМ ГОИ-54п. При применении заражённого КСМ МС-70 средний диаметр снижается на 9,0 % по сравнению с базовым КСМ МС-70, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ МС-70 и серпентинита, снижается на 29 % по сравнению с заражённым КСМ МС-70.

Затем рассмотрим изменение средней силы трения. При использовании заражённого КСМ Лита она возрастает на 7,0 % по сравнению с базовым КСМ Лита, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ Лита и серпентинита, снижается на 33 % по сравнению с заражённым КСМ Лита. При применении заражённого КСМ ЦИАТИМ-201 средняя сила трения снижается на 15 % по сравнению с базовым КСМ ЦИАТИМ-201. При использовании заражённого КСМ ГОИ-54п она возрастает на 25 % по сравнению с базовым КСМ ГОИ-54п, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ, ГОИ-54п и серпентинита, снижается на 10 % по сравнению с заражённым КСМ ГОИ-54п. При применении заражённого КСМ МС-70 средняя сила трения возрастает на 10 % по сравнению с базовым КСМ МС-70, а при применении СК, состоящей из заражённого КСМ МС-70 и серпентинита, снижается на 47 % по сравнению с заражённым КСМ МС-70.

### Заключение

По результатам исследований было выяснено, что при использовании заражённых КСМ чаще всего происходит ухудшение трибологических свойств по сравнению с базовыми КСМ. В свою очередь, заражённые КСМ, содержащие оптимальные концентрации серпентинита, продемонстрировали улучшение трибологических характеристик по сравнению с заражёнными КСМ, не содержащими серпентинита. Это указывает на эффективность добавления наполнителя, и, следовательно, на то, что проведение дальнейших исследований с другими наполнителями целесообразно и перспективно.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хебда М. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Хебда М., Чичинадзе А.В. М.: Машиностроение, 1990. 416 с.
2. Бреки А.Д., Толочко О.В., Васильева Е.С. и др. Состояние нефтяных смазочных композиционных материалов в подшипниковых узлах в процессе тепло-массообмена // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып.12. Ч. 1. С. 117–124. EDN: TKIWCX
3. Добрынина Т.В., Иванов Я.В. Системное биоповреждение авиационной техники // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. С. 194–196.
4. Ферзалиев В.М., Бабаев Э.Р., Алиева К.И. и др. Биоповреждение смазочных масел в условиях хранения // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. С. 24–28.
5. Варченко Е.А. Особенности оценки биоповреждений и биокоррозии материалов в природных средах [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 104 (10). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/135.pdf> Дата обращения: 01.09.2022. EDN: TFWSCD
6. Лаврушин А.В., Стариков Н.Е., Семенов С.А. и др. Оценка грибостойкости смазочных материалов, применяемых для защиты изделий машиностроения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 9. С. 307–314. EDN: OUZRNS
7. Бреки А.Д., Семенов С.А., Стариков Н.Е. и др. Влияние микроскопических грибов *Aspergillus niger* на триботехнические свойства пластичного смазочного материала марки «Лита» // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 7. С. 108–117. EDN: YAGHWH
8. Ефимочкина Н.Р., Седова И.Б., Шевелева С.А. и др. Токсигенные свойства микроскопических грибов // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 45. С. 6–33. DOI: 10.17223/19988591/45/1 EDN: HZPKXC
9. Власенко В.П., Осипов А.В., Костенко В.В. Состав и свойства горной породы серпентинит и возможности использования ее в качестве мелиоранта почв // Агрохимический вестник. 2019. № 4. С. 28–31. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10054 EDN: TFOQDK
10. Леонтьев Л.Б., Леонтьев А.Л., Погодаев А.В. Повышение надежности втулок цилиндров судовых дизелей (обзор) // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 3 (36). DOI: 10.5281/zenodo.1408233 EDN: UZCOUI
11. Бреки А.Д., Медведева В.В., Фадин Ю.А. и др. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами дисульфида вольфрама на трение в

подшипниках качения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 11. Ч. 1. С. 78–86. EDN: VLQLKF

12. Бреки А.Д., Медведева В.В., Фадин Ю.А. и др. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами диселенида вольфрама на трение в подшипниках качения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 11. Ч. 1. С. 171–180. EDN: VLQLPP

13. Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А. и др. Противоизносные свойства консистентного смазочного композиционного материала с наполнителем из дисперсных частиц слоистого модификатора трения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 4. С. 257–267. EDN: WDLKWB

14. Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Васильева Е.С. и др. Исследование модернизированных конструктивных смазочных материалов, содержащих мелкодисперсные частицы модификаторов трения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Машиностроение, 2010. 2-2 (100). С. 92–97. EDN: MUF PST

## REFERENCES

1. Hebda M. Tribotechnics data guide. In 3 vols. 2. Lubricants, lubrication technology, sliding and rolling bearings / Hebda M., Chichinadze A.V. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 416 p.
2. Breki A.D., Tolochko O.V., Vasilyeva E.S., et al. The condition of petroleum lubricating composite materials in bearing assemblies during heat and mass transfer // Izvestiya TulSU. Technical sciences, 2014, Issue 12, Part 1, pp. 117–124. EDN: TKIWCX
3. Dobrynina T.V., Ivanov Ya.V. Systemic biodeterioration of aviation equipment // Modern technologies for ensuring civil defense and eliminating the consequences of emergency situations, 2015, pp. 194–196.
4. Ferzaliev V.M., Babaev E.R., Alieva K.I. et al. Biodamage of lubricating oils under storage conditions // Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials, 2016, pp. 24–28.
5. Varchenko E.A. Features of the assessment of biological damage and biocorrosion of materials in natural environments [Electronic resource] // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University, 2014, No. 104 (10). Access mode: <http://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/135.pdf> Date of access: 09/01/2022. EDN: TFWSCD
6. Lavrushin A.V., Starikov N.E., Semenov S.A., et al. Evaluation of the fungus resistance of lubricants used for mechanical engineering products protection // Izvestia TulSU. Technical sciences, 2019, Issue 9, pp. 307–314. EDN: OUZRNS

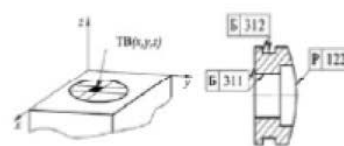
7. Breki A.D., Semenov S.A., Starikov N.E., et al. The effect of branching mycelium of fungi of the *Aspergillus niger* species on the tribological properties of the plastic lubricant of the LITA brand. // *Izvestiya TulGU. Technical sciences*, 2018, Issue 7, pp. 108–117. EDN: YAGHWH
8. Efimochkina N.R., Sedova I.B., Sheveleva S.A., et al. Toxigenic properties of mycotoxin-producing fungi // *Bulletin of Tomsk State University. Biology*. 2019. No. 45. pp. 6–33. DOI: 10.17223/19988591/45/1 EDN: HZPKXC
9. Vlasenko V.P., Osipov A.V., Kostenko V.V. The composition and properties of the serpentinite rock and the possibility of using it as a meliorant of soils // *Agrokhimicheskiy Vestnik*, 2019, No. 4, pp. 28–31. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10054 EDN: TFOQDK
10. Leontiev L.B., Leontiev A.L., Pogodaev A.V. Improving the reliability of cylinder bushings of marine diesel engines (review) // *Bulletin of the engineering school of FEFU*, 2018, No. 3 (36). DOI: 10.5281/zenodo.1408233 EDN: UZCOUI
11. Breki A.D., Medvedeva V.V., Fadin Yu.A., et al. The effect of a lubricating composite material with tungsten disulfide nanoparticles on friction in quality bearings // *Izvestiya TulSU. Technical sciences*, 2015, Issue 11, Part 1, pp. 78–86. EDN: VLQLKF
12. Breki A.D., Medvedeva V.V., Fadin Yu.A., et al. The effect of a lubricating composite material with tungsten diselenide nanoparticles on friction in bearings // *Izvestiya TulGU. Technical sciences*, 2015, Issue 11, Part 1, pp. 171–180. EDN: VLQLPP
13. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., et al. Anti-wear properties of a grease-based lubricating composite material with a filler made of dispersed particles of a layered friction modifier // *Izvestia TulSU. Technical sciences*, 2016, Issue 4, pp. 257–267. EDN: WDLKWB
14. Breki A.D., Chulkin S.G., Vasilyeva E.S., et al. Investigation of upgraded structural lubricants containing fine particles of friction modifiers // *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University. Issue: Mechanical Engineering*, 2010, 2-2 (100). pp. 92–97. EDN: MUF PST

**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. №3 (153). С.31-41.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №3 (153). P.31-41.

Научная статья  
УДК 629.4.023.142:624.078.8+621.791  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-31-41

## **Повышение жесткости кузова пассажирского вагона**

**Елена Витальевна Лукашова**<sup>1</sup>, инженер

**Дмитрий Яковлевич Антипин**<sup>2</sup>, к.т.н.

**Николай Александрович Лукашов**<sup>3</sup>, аспирант

<sup>1, 2, 3</sup> *Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия*

<sup>1</sup> leno4kachepikova@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-2236-728X>

<sup>2</sup> adya2435@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8246-6271>

<sup>3</sup> Lukashov32@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0005-6733-2039>

**Аннотация.** Рассмотрены методы обеспечения требуемой жесткости кузовов пассажирских вагонов, которые позволили выявить основные конструктивные решения, и технология их сборки. Получены варианты с усилением рамы вагона дополнительными элементами, с установкой одной и двух поперечных перегородок, а также вариант с двумя перегородками, связанными между собой продольными элементами. В качестве критерия выбора рационального конструктивного решения повышения жесткости несущей конструкции кузова приняты первая частота изгибных колебаний, максимальные напряжения, действующие в зоне усиления конструкции, а также величина увеличения массы, связанная с введением дополнительных элементов. Проведен анализ эффективности предложенных конструктивных решений в рамках принятых критериев с помощью метода конечных элементов. Установлено, что наиболее оптимальным для увеличения жесткости кузова является вариант усиления, который предусматривает установку двух несущих перегородок, связанных между собой продольными элементами. Данный вариант позволяет при незначительном увеличении массы кузова повысить его жесткость до 8,92 Гц и снизить максимальные напряжения, действующие в зонах усиления, до 167,2 МПа. Установлено, что усиление, которое предусматривает установку двух несущих перегородок, связанных между собой продольными элементами, является эффективным и работоспособным, поэтому рекомендуется к дальнейшему исполнению в новых конструкциях кузовов пассажирских вагонов. В связи с этим разработан технологический процесс сборки кузова с усиленной конструкцией и представлена его технологическая схема сборки. Установлено, что изменение технологического процесса производства кузова пассажирского вагона от внедрения новых элементов не потребует создания дополнительных производственных линий, т. к. сборку можно выполнить на имеющемся на производственной линии оборудовании. Рекомендовано в технологическом процессе использование портальной контактной точечной машины с двухсторонним подводом тока, которая позволит обеспечить качество технологического процесса сборки.

**Ключевые слова:** кузов пассажирского вагона, несущая конструкция, жесткостные свойства, собственная частота изгибных колебаний, технологический процесс

**Для цитирования:** Лукашова Е.В., Антипин Д.Я., Лукашов Н.А. Повышение жесткости кузова пассажирского вагона // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 31–41. doi: 10.30987/2223-4608-2024-31-41



## Passenger car body stiffening

Elena V. Lukashova<sup>1</sup>, engineer

Dmitry Ya. Antipin<sup>2</sup>, PhD Eng.

Nikolay A. Lukashov<sup>3</sup>, PhD student

<sup>1, 2, 3</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> leno4kachepikova@gmail.com

<sup>2</sup> adya2435@gmail.com

<sup>3</sup> Lukashov32@gmail.com

**Abstract.** Methods for ensuring the required stiffness of passenger car bodies are viewed, making it possible to identify the main design solutions and the technology of their assembly. Alternate designs of stiffening carriage frame with additional elements, using one and two cross ridge partitions, as well as a model with two partitions connected by longitudinal elements were obtained. The lowest bending vibrations frequency, maximum stresses acting in the frame stiffening zone, as well as the mass penalty due to the introduction of additional elements were adopted as the criterion for choosing a rational constructive solution for stiffening supporting structures. The effectiveness analysis of the proposed constructive solutions is carried out within the framework of the accepted criteria using the finite element method. It was found that the most optimal way for body stiffening is a model with two load-bearing partitions interconnected by longitudinal elements. This alternate design renders possible, with a slight increase in body weight, to increase body stiffness up to 8,92 Hz and reduce the maximum stresses acting in the amplification zones to 167,2 MPa. It has been found that stiffening owing to two load-bearing partitions interconnected by longitudinal elements, is effective and workable, therefore it is recommended for further new designs of passenger car bodies. In this regard, the technological process of assembling the body with a strengthened design has been developed and its assembly design project is presented. It is found that the change in the process operation of the passenger car body production due to new elements do not require the additional production lines, since assembly can be performed using the equipment available on the existing production line. It is recommended to use a portal contact point machine with a double inlet current supply in the process operation, which will ensure the quality of the assembly process.

**Keywords:** passenger car body, supporting structure, stiffness properties, natural frequency of bending vibrations, process operation

**For citation:** Lukashova E.V., Antipin D.Ya., Lukashov N.A. Passenger car body stiffening / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 3 (153). P. 31–41. doi: 10.30987/2223-4608-2024-31-41

### Введение

Технологическое повышение надежности изделий заключается в повышении их эксплуатационных свойств [1]. Согласно одноступенчатому технологическому обеспечению эксплуатационных свойств необходимо объединение конструкторских и технологических задач. За счет определения оптимальных по себестоимости технологических операций ещё на стадии проектирования возможно повысить надежность процесса проектирования и снизить себестоимость изделий [2].

При проектирование пассажирского подвижного состава основными задачами для инженеров являются факторы, гарантирующие его конкурентоспособность, такие как безопасность, комфорт, надежность и снижение себестоимости. Для решения данных задач основным является усовершенствование несущей конструкции кузова пассажирского вагона. Проведенный анализ отечественных [3, 4] и зарубежных производителей позволил

установить, что конструкции кузова, в основном, представляют собой тонкостенные подкрепленные оболочки с вырезами. Одной из основных характеристик для них является жесткость.

Достаточная жесткость достигается не только за счет составляющих элементов самой конструкции, но и важную роль играет взаимодействие при контакте поверхностей одних элементов с другими. Контактная жесткость подчеркивает способность конструкции сопротивляться деформациям в результате ее взаимодействия с другими объектами. При расчете конструкций важно учитывать как общую жесткость, так и контактную жесткость, чтобы обеспечить надежность и эффективность в условиях реальной эксплуатации [5].

Жесткостные свойства кузова пассажирского вагона влияют на частоту его колебаний во время движения [6], которая, в свою очередь, оказывает воздействие на усталостную долговечность несущей конструкции и на уровень комфорта пассажиров. Данные

свойства могут быть обеспечены при помощи совершенствования технологии производства, а также оптимизации конструкции, которая также повышает ее стабильность. Технология производства включает в себя такие аспекты, как выбор материалов с высокой прочностью, использование усиленных сварных соединений, применение особых технологий обработки материалов и другие технологические методы, направленные на обеспечение необходимых свойств, что в свою очередь способствует повышению надежности вагонов в процессе эксплуатации [7].

Проведенный анализ методов обеспечения требуемой жесткости кузовов пассажирских вагонов позволил установить, что основная тенденция в данной области сводится к оптимизации конструкции на основе следующих вариантов типовых решений: применение не плоских боковых стен (цилиндрической формы большого радиуса); повышение площади поперечных несущих элементов кузова или введение дополнительных продольных элементов в контур поперечного сечения; установка дополнительных несущих перегородок; нанесение специальных амортизирующих покрытий на боковые стены вагона.

### Методы и средства

Методы повышения жесткости с использованием конструкций кузовов, имеющих не плоские боковые стены, также повышают аэродинамические качества вагона и применимы в большинстве случаев для высокоскоростных поездов. Для спальных вагонов, которые в свою очередь составляют основной парк пассажирского подвижного состава, указанный метод менее эффективен, т. к. потребует значительных капитальных вложений в перестройку технологических процессов изготовления кузовов, значительно усложнит технологию сборки стен, а также приведет к недоиспользованию габарита подвижного состава.

Для применения демпфирующих покрытий, повышающих жесткость кузова, требуется использование дорогостоящих полимерных материалов. Кроме того, данный метод требует полностью перестроить существующую технологию производства пассажирских вагонов.

С учетом вышеописанного, для увеличения жесткости несущей конструкции кузовов отечественных пассажирских вагонов рационально рассмотреть варианты, связанные с добавлением дополнительных продольных элементов или перегородок в несущую систему кузова. Эти методы не требуют значительных изменений в технологии производства, что позволит снизить общую стоимость проекта оптимизации конструкции [8].

Данные конструктивные решения целесообразно применить в кузовах несамоходных пассажирских вагонов локомотивной тяги. В качестве объекта исследования принят спальный вагон модели 61-4517 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод».

На основе анализа методов усиления конструкции вагона для повышения ее жесткости были предложены четыре варианта: первый – усиление рамы вагона, путем введения дополнительных продольных элементов; второй – установка дополнительной несущей перегородки в среднем сечении кузова; третий – установка двух несущих перегородок на расстоянии  $1/3$  длины рамы; четвертый – установка двух несущих перегородок на расстоянии  $1/3$  длины рамы, связанных между собой продольными элементами, расположенными на крыше, раме и боковых стенах кузова (рис. 1).

Для каждого из вариантов сформированы от четырех до десяти конструктивных исполнений с различными сочетаниями подкрепляющих элементов.

Для первого варианта в качестве продольных элементов были применены: швеллер стальной гнутый равнополочный ГОСТ 8278-83  $100 \times 60 \times 60 \times 4$ ; профиль стальной гнутый замкнутый сварной квадратный и прямоугольный для строительных конструкций ГОСТ 19771-2012  $100 \times 100 \times 4$ ; уголок стальной гнутый равнополочный ГОСТ 19771-93  $100 \times 100 \times 4$ ; профиль стальной гнутый зетовый ГОСТ 13229-78  $100 \times 110 \times 49 \times 4$ . В работе рассмотрены четыре конструктивных исполнения усиления рамы. В вариантах, которые предусматривают установку дополнительной несущей перегородки в среднем сечении и установку двух несущих перегородок, находящихся друг от друга на расстоянии  $1/3$  длины рамы, конструкцию

каркаса перегородки предложено выполнить по типу межкупейной. Это позволит уменьшить дополнительный вес варианта усиления, поскольку вводятся элементы взамен штатных. Кроме того, внесение изменений в конструкцию не должно приводить к возникновению новых трудоемких технологических операций или необходимости приобретения нового оборудования.

В качестве подкрепляющего набора рассматривалось десять конструктивных исполнений каркаса перегородки с различными видами сечения. В качестве профилей был принят сортамент, уже используемый при изготовлении кузова вагона: зетового сечения, швеллер, равнополочный уголок, неравнополочный уголок. Из десяти вариантов был выбран самый оптимальный, отвечающий всем требованиям жесткости и прочности.

Четвертый вариант усиления за счет установки двух несущих перегородок, связанных между собой продольными элементами аналогичен третьему за исключением того что, боковые стены, раму и крышу, составляющие которых располагаются между двумя несущими перегородками, усиливаются с помощью элементов в виде перфорированного гнутого зетового профиля размером  $40 \times 65 \times 45 \times 2,5$  мм. Конструкция каркасов двух несущих перегородок выполнена аналогично предыдущему варианту. Для третьего и четвертого вариантов усиления рассмотрены по десять конструктивных исполнений. Расчет выполнялся методом конечных элементов [9], по методике, представленной в работах [10].

В соответствии с методикой [10] для каждого из вариантов (рис. 1) были созданы конечно-элементные модели кузова. Верификация базовой модели кузова, соответствующей серийному вагону выполнена на основе данных натурных стендовых испытаний, приведенных в работе [10]. Разность по максимальным напряжениям для испытательных режимов нагружения не превышала 10 %. По величине собственной частоты изгибных колебаний – 11,9 %. На основе базовой конечноэлементной модели сформированы варианты, соответствующих различным конструктивным исполнениям усиления, описанных выше.

### Результаты и обсуждение

На основе созданных конечноэлементных моделей определены величины первой

собственной частоты изгибных колебаний  $f$ . Для выбора наиболее эффективного варианта также были рассчитаны максимальные напряжения в зоне усиления, от действия нагрузок и значения увеличения массы конструкции кузова, связанного с внедрением усиления.

Было установлено, что первый вариант усиления позволил увеличить показатель жесткости до 8,19 Гц. Масса кузова при этом увеличилась на 199 кг, а максимальные действующие напряжения достигли значения 178,2 МПа. Второй вариант повышает значение частоты колебаний до 8,18 Гц при увеличении массы кузова до 79 кг, а максимальные напряжения приближаются к значению 173,9 МПа.

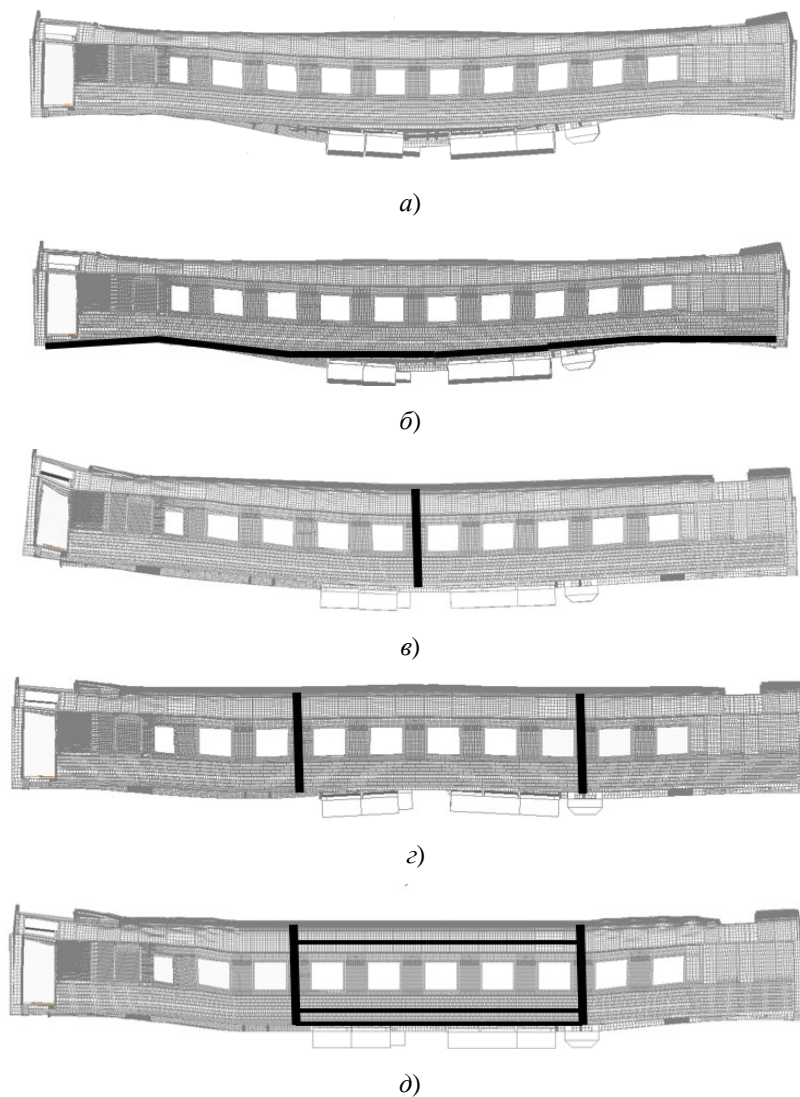
Показатель жесткости для третьего варианта усиления возрастает до значения 8,53 Гц. Масса кузова при этом возросла на 159 кг, а максимальные действующие напряжения достигли 168,3 МПа. При усилении конструкции с помощью четвертого варианта жесткостной показатель  $f$  увеличивается до 8,92 Гц. Масса при этом стала больше на 282 кг, а напряжения приблизились к значению в 167,2 МПа.

Анализ полученных результатов позволил прийти к заключению, что повышение жесткости кузова за счет усиления рамы дает наименьший эффект при значительном увеличении массы кузова (см. рис. 1, б).

Применение усиливающей перегородки в середине кузова вагона увеличивает жесткость контура поперечного сечения кузова. Однако, эффект наблюдается локальный. При этом, увеличение жесткости кузова сопоставимо с первым вариантом усиления, но при меньшем (до 2,5 раз) увеличении массы кузова (см. рис. 1, в), и большим снижением максимальных действующих напряжений. Применение двух усиливающих перегородок (см. рис. 1, г) приводит к распространению эффекта увеличения жесткости контура несущей оболочки кузова на большую длину базы вагона. При этом форма колебания кузова на длине базы сменяется с одной волны на две. Наблюдается более интенсивный рост жесткости кузова, при этом увеличение его массы сопоставимо с первым вариантом усиления. Четвертый вариант позволяет устранить недостаток третьего, связанный с взаимными

колебаниями усиливающих перегородок. Введение соединительных элементов (см. рис. 1, *д*) позволяет работать двум перегородкам как одной несущей системе, что обеспечивает наибольший рост жесткости кузова, и

позволяет обеспечить увеличение первой собственной частоты изгибных колебаний на 9,5 %. При увеличении массы в пределах 255...282 кг и максимальном снижении действующих напряжений.



**Рис. 1. Формы колебаний металлоконструкции кузова пассажирского вагона:**

*a* – базовый вариант; *b* – первый вариант с усиленной рамой; *в* – второй вариант модели с одной усиливающей перегородкой; *г* – третий вариант модели с двумя усиливающими перегородками; *д* – четвертый вариант модели с двумя усиливающими перегородками, связанными продольными элементами

**Fig. 1. Vibration patterns of the metal structure of the passenger car body:**

*a* – basic version; *b* – the first version with a stiffened frame; *c* – the second version of the model with one strengthening partition; *d* – the third version of the model with two strengthening partitions; *d* – the fourth version of the model with two reinforcing partitions connected by longitudinal elements

На основе полученных данных было установлено, что наиболее эффективным для увеличения жесткости кузова является

четвертый вариант усиления, который предусматривает установку двух несущих перегородок, связанных между собой продольными

несущими элементами. Данный вариант позволяет при незначительном увеличении массы кузова повысить его жесткость и снизить максимальные напряжения, действующие в зонах усилений.

Для оценки работоспособности принятого варианта усиления конструкции кузова были рассчитаны вертикальные  $a_v$  и горизонтальные  $a_h$  ускорения в середине кузова.

Данные, полученные в результате расчета конструкции кузова с усилениями, сопоставлялись с данными, полученными при расчете базового варианта конструкции. Графики зависимости ускорений кузова от скорости движения состава представлены на рис. 2 и рис. 3.

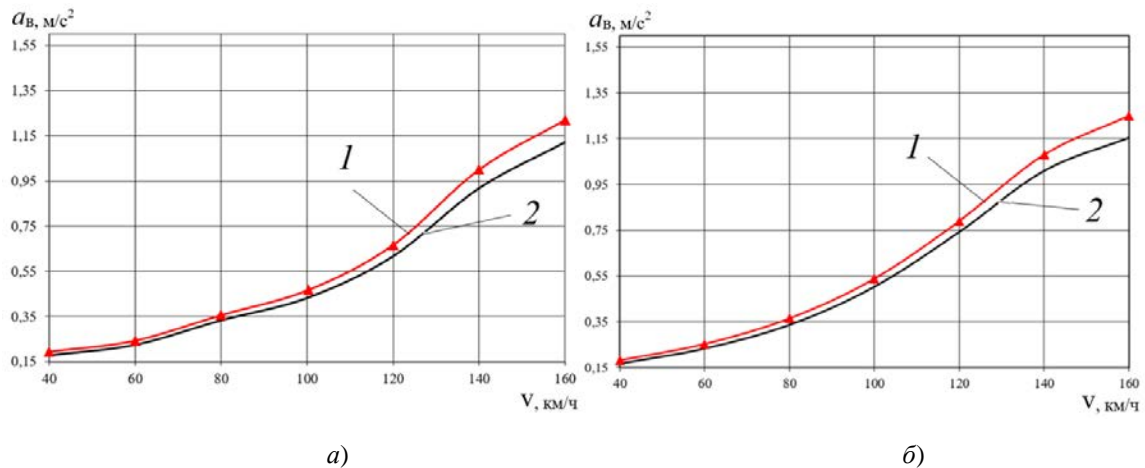


Рис. 2. Зависимости вертикальных ускорений кузова от скорости движения вагона:

$a$  – на прямом участке;  $b$  – в кривой;

1 – базовый вариант; 2 – вариант с усиленной конструкцией

Fig. 2. Dependences of vertical accelerations of the body on the car speed:

$a$  – in a straight track;  $b$  – in a curve;

1 – basic version; 2 – version with supported construction

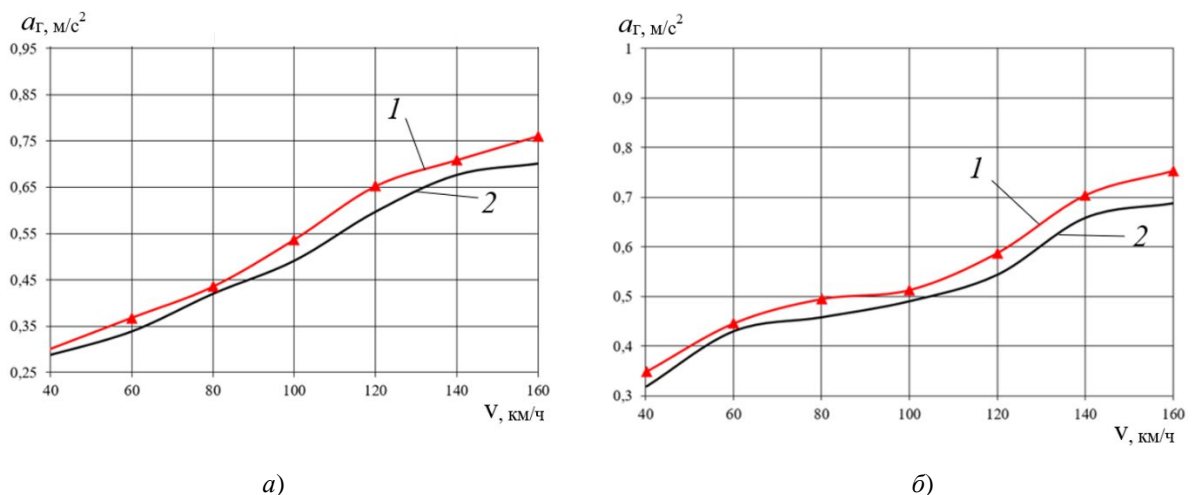


Рис. 3. Зависимости горизонтальных ускорений кузова от скорости движения вагона:

$a$  – на прямом участке;  $b$  – в кривой;

1 – базовый вариант; 2 – вариант с усиленной конструкцией

Fig. 3. The dependence of the horizontal accelerations of the body on the car speed:

$a$  – in a straight track;  $b$  – in a curve;

1 – basic version; 2 – version with supported construction

Полученные результаты показывают, что усовершенствованный вариант превосходит базовый по следующим значениям динамических показателей: вертикальные ускорения кузова снизились на 6,52...8,24 % – на прямых участках пути; на 6,13...8,75 % – в кривых; горизонтальные ускорения кузова снизились на 3,45...7,85 % – на прямых участках пути; на 3,65...8,70 % – в кривых.

Также была определена динамическая нагруженность кузова базового варианта и варианта с усилением конструкции. Результаты сравнения зафиксированных в среднем сечении

кузова на уровне пола спектральной плотности мощности вертикального виброускорения  $W$  для различных частот колебаний  $f$  и скоростей движения  $v$  представлены в виде графиков зависимости и приведены на рис. 4.

Представленные в виде графиков результаты показывают, что спектральная плотность мощности вертикального виброускорения варианта с усилением снизились до 25,6 %, при этом увеличение частоты колебаний достигло 12 % в сопоставлении с базовым вариантом кузова.

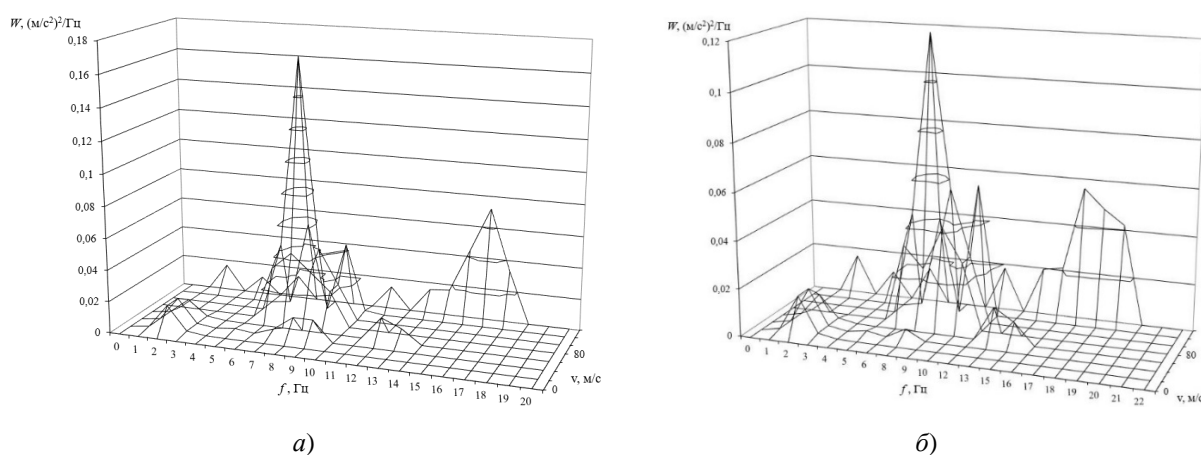


Рис. 4. Зависимости спектральной плотности мощности вертикального виброускорения от частоты колебаний кузова в среднем сечении на уровне пола:

*a* – базовый вариант; *б* – вариант с усиленной конструкцией

Fig. 4. Dependences of the spectral power density of vertical vibration acceleration on the frequency of vibrations of the body in the middle section at floor level:

*a* – basic version; *b* – version with supported construction

В результате оценки принятого варианта усиления несущей конструкции подтверждается его эффективность и работоспособность. В этой связи усиление, которое предусматривает установку двух несущих перегородок, связанных между собой продольными элементами, рекомендуется к дальнейшему исполнению в новых конструкциях кузовов пассажирских вагонов.

Проведенные исследования требуют внесения дополнительных операций в технологию изготовления кузова пассажирского вагона.

На первом этапе происходит сборка крупногабаритных узлов, таких как крыша, рама, боковые и торцевые стены, тамбурные

простенки, а также введенные в качестве дополнительных элементов жесткости поперечные перегородки [11]. Производство чаще всего имеет локальную механизацию отдельных работ, которое предусматривает широкое использование цеховых кранов. Все плоские узлы кузова, включая дополнительные перегородки собираются и свариваются на специализированных стендах. Они обслуживаются сварочной машиной и двумя сборочными порталами. Чтобы обеспечить работу без простоя при работе сварочной машины на одном из стендов, на втором происходит сборка следующего узла. По фиксаторам на стенд укладывается обшивка. После чего выполняется раскладка подкрепляющих элементов, а также

дополнительных жесткостных элементов гнутого зетового профиля при помощи соответствующей сборочной скобы, которая осуществляет их прихватку и прижим. Такие узлы, как поперечные перегородки не имеют обшивки, поэтому на стенде происходит раскладка их подкрепляющих элементов, проектное положение которых задаются механизмами пневмоцилиндров, поворотами коромысел и упоров. Предварительный изгиб под сварку элементов к обшивке создают прижимы и пневмоцилиндры. После постановки прихваток пневмоцилиндры выключают и сборочный портал перемещают в новое положение.

Сварку обшивки с подкрепляющими элементами необходимо выполнять с помощью портальной контактной точечной машины с двухсторонним подводом тока, поэтому плоские

узлы, собранные на прихватках с помощью подъемных опор, поднимают под поверхность сборочного стенда.

Во время сварки продольных точечных швов, машина с тремя контактными точками движется вдоль стенда по рельсовым направляющим, а для сварки поперечных швов верхний и нижний сварочные агрегаты синхронно перемещаются относительно портала.

В тоже время отличие от плоских узлов вагона (боковые стены, настил пола, перегородки) крыша имеет корытообразную конструкцию, имеющую подкрепляющий набор в виде зетового сечения. Крыши вагонов при производстве монтируют из секций трех типовых размеров длиной по 4,5 м, изготавливаемых в одной поточной линии (рис. 5).

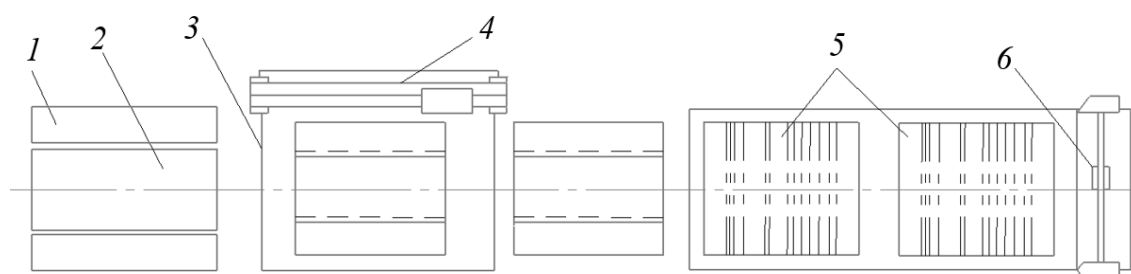


Рис. 5. Схема поточной линии сборки и сварки секций крыши

Fig. 5. Diagram of the assembly line and welding of roof sections

На столе стенда 3 собирается обшивка секции. Средний элемент 2 и два элемента округлений 1 укладываются по фиксаторам. При помощи дуговой сварки нахлесточные соединения тонкостенных элементов сваривают угловым швом. Передвижной портал 4 с пневмоприжимами обеспечивает прижатие кромок нахлестки к медной прокладке, а также способствует направлению сварочной головки вдоль шва. Сборка и сварка разных по конструкции секций (крайней, головной и двух средних) выполняется в стапеле 5. С помощью медных шин дуги штапеля размещаются дуги крыши и дополнительные жесткостные элементы гнутого зетового профиля и прижимаются пневмоцилиндрами.

Сверху накладывают обшивку и приваривают ее к остальным элементам односторонней контактной сваркой парными точками. Перемещаясь от дуги к дуге, портальная

машина 6 имеет точную установку и фиксацию. Подвижная двухэлектродная головка перемещается вдоль по криволинейным направляющим портала. Секции крыши на стапеле можно собирать и сваривать независимо друг от друга, т. е. в то время, как первую секцию собирают, вторую сваривают, а готовую третью снимают со стапеля.

Местную жесткость листовой обшивки необходимо увеличить за счет создания гофров. При этом повысится устойчивость тонколистовых элементов под нагрузкой и снижается их коробление от сварки. Соединения обшивки с элементами жесткости выполнять точечной контактной сваркой. При сварке обшивки с элементами жесткости использовать портальную контактную точечную машину с двусторонним подводом тока.

Кузов пассажирского вагона собирается блочным способом из готовых узлов. Технологическая схема сборки усиленной конструкции кузова пассажирского вагона представлена на рис. 6.

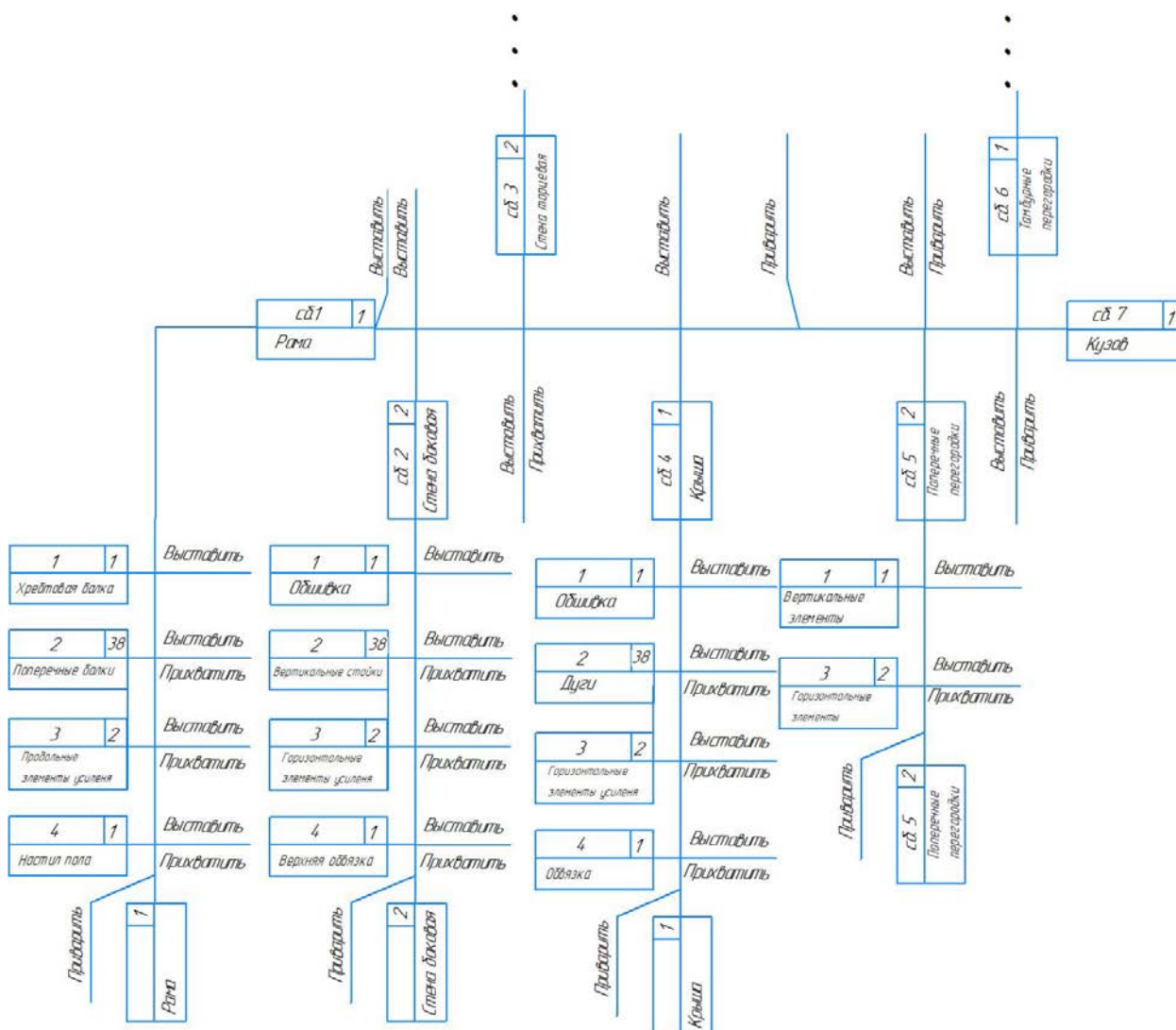


Рис. 6. Схема сборки усиленной конструкции кузова

Fig. 6. Assembly diagram of strengthened body design

При сборке базовым узлом выступает рама. Ее устанавливают на технологические тележки и выравнивают с помощью подъемных домкратов в горизонтальной плоскости. Боковые стены выставляют в вертикальном положении и закрепляют с использованием прижимных устройств. Далее устанавливаются торцевые стены, поджимаемые к концевым балкам рамы. Торцевые, боковые стены и раму совмещают по стыкам и прихватывают электродуговой сваркой. Последним установочным узлом является крыша, которую совмещают с верхней обвязкой боковых стен и торцевыми стенами. После устранения зазоров между основными узлами кузова, его подают на позицию сварки. В качестве перспективного

способа сварки рекомендуется использовать дуговую сварку порошковой проволокой. Последовательное наложение швов снизит возможность появления сварочных деформаций и искажения геометрических размеров конструкции. Сварочные работы внутри кузова выполняются полуавтоматической сваркой среде углекислого газа.

В сваренный кузов устанавливаются ранее собранные две дополнительные несущие перегородки, а также тамбурная, которые также приваривают полуавтоматической сваркой среде углекислого газа к основным узлам.

Основные несущие элементы кузовов выполняются из нержавеющей сталей. Они не подвергаются термической обработке потому



не требуют никакой предварительной подготовки к сварке. В серийном производстве вагонов для деталей из холоднокатаной стали подготовка поверхности не влияет на процесс сварки, но снижает износ электродов, поэтому необходимо произвести очистку поверхностей от жира и др. загрязнений. Обезжиривание поверхности выполнять специальным раствором на основе трихлорэтилена. Деталь необходимо окунуть в данный раствор на 3,0...5,0 мин, можно больше в зависимости от загрязнения. После высыхания поверхностей, можно приступить к сварке.

Кроме того, в процессе производства пассажирских вагонов широко используют болтовые соединения. Их контактное взаимодействие также оказывает влияние на общую жесткость кузова. Однако в представленной работе изменение технологического процесса обработки данных поверхностей рассмотрено не было и является темой дальнейших исследований.

В связи с этим описанный технологический процесс вносит незначительные изменения в технологию изготовления основных узлов кузова пассажирского вагона, при этом необходимости в создании дополнительных производственных линий сборки нет. Сборка новых элементов может происходить на уже имеющемся технологическом оборудовании.

### Заключение

Предложенный вариант усиления конструкции кузова пассажирского вагона путем введения двух несущих перегородок на расстоянии 1/3 длины рамы, связанных между собой продольными элементами, расположенными на крыше, раме и боковых стенах кузова, является наиболее эффективным из рассмотренных и позволяет при незначительном увеличении массы кузова повысить жесткость кузова до 8,92 Гц и снизить максимальные напряжения, действующие в зонах усиления до 167,2 Мпа.

Установлено что предложенный вариант усиления является эффективным и работоспособным, поэтому рекомендуется к дальнейшему исполнению в новых конструкциях кузовов пассажирских вагонов.

Разработан технологический процесс сборки кузова с усиленной конструкцией.

Представлена его технологическая схема сборки.

Изменение технологического процесса производства кузова пассажирского вагона от внедрения новых элементов не потребует создания дополнительных производственных линий, их можно выполнить на имеющемся оборудовании. Использование портальной контактной точечной машины с двухсторонним подводом тока позволит обеспечить качество технологического процесса сборки.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Фундаментальные** основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Сулова. М.: Иновационное машиностроение, 2022. 552 с.
2. **Сулов А.Г.** Технология машиностроения: учебник для студентов. 2-е изд. Перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2007. 430с.
3. **Вибрации** в технике: справочник в 6 т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / В.К. Асташев, В.И. Бабицкий, И. И. Быховский и др.; под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение. 1995. 456 с.
4. **Светлов В.И.** Технические решения по механике пассажирских вагонов. Методы обоснования. М.: Глобус, 2002. 200 с.
5. **Сулов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320с.
6. **Горохова М.В.** Динамическая жесткость пластин с вырезами // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2004. № 10. С. 11–14.
7. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т.2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение-1, 2003. 944с.
8. **Антипин Д.Я., Лукашова Е.В., Болдырев А.П., Лозбинев Ф.Ю.** Обоснование конструктивных решений по повышению жесткости несущей конструкции кузова пассажирского вагона // Транспортное машиностроение. 2023. № 5. С. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2023-5-60-68>
9. **Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е.** NX Advanced Simulation. Практическое пособие. М.: МДК Пресс. 2014. 112 с.
10. **Антипин Д.Я., Лукашова Е.В., Болдырев А.П., Лозбинев Ф.Ю.** Совершенствование методики оценки вибрационной нагруженности кузова пассажирского вагона // Транспортное машиностроение. 2023. № 4 (16). С. 39–46.
11. **Технология** производства и ремонта вагонов: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / К.В. Мотовилов, В.С.

Лукашук, В.Ф. Криворудченко, А.А. Петров; под ред. К.В. Мотовилова. М.: Маршрут, 2003. 382 с.

12. **Теория** и технология контактной сварки: учебное пособие / Р.Ф. Катаев, В.С. Милютин, М.Г. Близник. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 144 с.

#### REFERENCES

1. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of mechanical engineering products / ed. by A.G. Suslov. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2022, 552 p.

2. Suslov A.G. Technology of mechanical engineering: textbook for students. 2nd ed. Updated and revised. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 430 p.

3. Vibrations in technology: handbook in 6 volumes, vol. 6. Protection from vibration and shocks / V. K. Astashev, V. I. Babitsky, I. I. Bykhovsky, et al; edited by K. V. Frolov. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 456 p.

4. Svetlov V.I. Technical solutions for the mechanics of passenger cars. Methods of justification. Moscow: Globus, 2002, 200 p.

5. Suslov A.G. The quality of the surface layer of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 2000, 320 p.

6. Gorokhova M.V. Dynamic stiffness of notched plates // Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport, 2004, No. 10, pp. 11–14.

7. Handbook of a machine-building technologist, in 2 volumes, vol.2 / Edited by A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakova. Moscow: Mashinostroenie-1, 2003, 944 p.

8. Antipin D.Ya., Lukashova E.V., Boldyrev A.P., Lozbinev F. Yu. Substantiation of constructive solutions to increase the rigidity of the supporting structure of the passenger car body // Transport machine building, 2023, No. 5, pp. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2023-5-60-68>

9. Goncharov P.S., Artamonov I.A., Khalitov T.F., Denisikhin S.V., Sotnik D.E. NX Advanced Simulation. Practical guide. Moscow: MDK Press, 2014, 112 p.

10. Antipin D.Ya., Lukashova E.V., Boldyrev A.P., Lozbinev F.Yu. Improving the methodology for assessing the vibration load of the passenger car body // Transport engineering, 2023, No. 4 (16), pp. 39–46.

11. Technology of production and repair of wagons: Textbook for universities of railway transport / K.V. Motovilov, V.S. Lukashuk, V.F. Krivoruchenko, A.A. Petrov; edited by K.V. Motovilov. Moscow: Marshrut, 2003, 382 p.

12. Theory and technology of contact welding: a textbook / R.F. Kataev, V.S. Milyutin, M.G. Bliznyuk. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University, 2015, 144 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 18.12.2023; одобрена после рецензирования 25.12.2023; принята к публикации 09.01.2024.

The article was submitted 08.12.2023; approved after reviewing 25.12.2023; assepted for publication 09.01.2024.

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. №3 (153). С.42-48.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №3 (153). P.42-48.

Научная статья  
УДК 621(075)  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-42-48

## Технологическое уменьшение времени приработки поверхностей трения

Анатолий Григорьевич Суслов<sup>1</sup>, д.т.н.

Михаил Геннадьевич Шалыгин<sup>2</sup>, д.т.н.

<sup>1,2</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

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

<sup>2</sup> migshalygin@yandex.ru, orcid// 0000-0002-8102-9918

**Аннотация.** Проведен анализ работ по управлению процессами, происходящими в период приработки деталей пар трения. Приведены технологические и другие способы уменьшения времени процесса приработки. Представлены режим и оборудование проведенного низкотемпературного отжига в диоксиде кремния. Приведены средства измерения шероховатости, химического состава, структуры и износа поверхности. Установлено, что при проведении низкотемпературного отжига в диоксиде кремния происходит выглаживание микронеровностей поверхности по основным параметрам шероховатости. Высотные параметры шероховатости  $R_a$ ,  $R_{max}$  уменьшились: параметр  $R_a$  в 4,5 раз; параметр  $R_{max}$  – в 5,1 раз. Шаговые параметры  $S$ ,  $S_m$  повели себя разнонаправленно: параметр  $S_m$  увеличился в 2,2 раза; параметр  $S$  уменьшился в 1,6 раз. Уменьшение высотных  $R_a$ ,  $R_{max}$  и увеличение шаговых  $S_m$  параметров шероховатости свидетельствует о выглаживании поверхности в следствии проведенного отжига. Уменьшение параметра  $S$  говорит об общем уменьшении количества выступов шероховатости. Также следует отметить уменьшение значения параметра опорной кривой профиля  $tr$  на уровне 50 %, как характеристики уменьшения несущей способности материала. Результаты химического анализа показали увеличение в поверхностном слое количества кремния и уменьшения количества хрома. Металлографический анализ позволил установить образование поверхностного слоя, насыщенного кремнием. В результате испытаний на износ, установлено, что суммарный износ пары трения образца после проведения низкотемпературного отжига уменьшился по сравнению с базовым образцом. При испытаниях на износ использовалась схема цилиндр-плоскость при нагрузке 30 Н.

**Ключевые слова:** приработка, низкотемпературный отжиг, диоксид кремния, износ, качество поверхности

**Для цитирования:** Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. Технологическое уменьшение времени приработки поверхностей трения // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-42-48

## Technological running-in time reduce for friction surfaces

Anatoly G. Suslov<sup>1</sup>, D. Eng.

Mikhail G. Shalygin<sup>2</sup>, D. Eng.

<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

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

<sup>2</sup> migshalygin@yandex.ru

**Abstract.** The process control analysis for the period of running-in of friction pair parts is carried out. Technological and other ways for running-in time reduce are given. The mode and equipment of low-temperature annealing in silicon dioxide are presented. Roughness measurement instrument, chemical composition measurement, structure and wear measurement of the surface are provided. It is found that under low-temperature annealing in silicon dioxide, the surface roughness is smoothed according to the main roughness parameters. The height roughness parameters  $R_a$ ,  $R_{max}$  decreased:  $R_a$  (parameter) by 4,5 times; the  $R_{max}$  (parameter) by 5,1 times. The stepwise parameters  $S$ ,  $S_m$  had differently directed movement: the parameter  $S_m$  increased by 2,2 times; the parameter  $S$  decreased by 1,6 times. A decrease in the height  $R_a$ ,  $R_{max}$  and an increase in the stepwise  $S_m$

*roughness parameters proves surface smoothing resulted from annealing. A decrease in the parameter  $S$  indicates a general decrease in the number of roughness peaks. It should also be noted that the value of the parameter of the  $t_p$  profile reference curve decreases by 50 %, as a characteristic of reducing the bearing capacity of the material. The results of the chemical analysis showed an increase in the amount of silicon in the surface layer and a decrease in the amount of chromium. Metallographic analysis made it possible to come at the formation of a surface layer enriched with silicon. As a result of wear tests, it was found that the total wear of a sample friction pair after low-temperature annealing decreased as compared to the base sample. Under wear tests, the cylinder-plane scheme was used at the load of 30 N.*

**Keywords:** running-in, low-temperature annealing, silicon dioxide, wear, surface quality

**For citation:** Suslov A.G., Shalygin M.G. Technological running-in time reduce for friction surfaces / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 3 (153). P. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-42-48

В инженерной практике принято считать, что в процессе приработки трущихся поверхностей происходит пластические и упругие деформации макро-, микро- и нанонеровностей. Причем смещение поверхностей перед каждым новым приложением нагрузки будет вызывать упругие и пластические деформации или срез ранее не контактирующих поверхностей, после многократных смещений и повторных приложений нагрузки все большая часть неровностей будет деформироваться упруго и все меньшая их часть будет иметь пластический характер. При уменьшении длительности процесса приработки неровности поверхностей трения быстрее приобретают равновесную шероховатость и скорость изнашивания уменьшается. В этой связи пути уменьшения времени на приработку поверхностей трения представляют интерес для научной общественности.

Ведется анализ процессов формирования микропрофиля поверхностей деталей машин на этапах обработки и приработки [1]. Разрабатываются методы технологического управления физико-химическими параметрами поверхностных слоев [2]. Проводятся исследования износостойкости, контактной жесткости и антифрикционных свойств поверхностей после их напыления и упрочнения [3]. Предлагаются новые методики приработки [4], которая состоит из двух режимов. На первом режиме задаётся максимальная нагрузка, ниже нагрузки «заедания» при минимальной скорости скольжения. На втором режиме задаётся минимальная нагрузка и максимальная

скорость скольжения. Получены переходные характеристики приработки трибосистем, которые позволяют установить взаимосвязь между конструкцией трибосистемы, рациональными режимами нагружения, временем приработки и износом за приработку. Проводится моделирование процессов приработки для поверхностей различной геометрии и упрочнения [5].

Исследуются трибологические характеристики и микрогеометрия поверхностей антифрикционных сплавов в период приработки [6]. Показано, что при малых нагрузках микрогеометрия оказывает более сильное влияние на трибологические характеристики, чем при высоких нагрузках. Для минимального и среднего значения нормальной нагрузки выявлен эффект образования равновесной шероховатости, не зависящей от исходного качества поверхности трения. Исследуются влияние приработки на трибологические свойства различных фрикционных материалов [7]. Рассматривается процесс нанесения внешних антифрикционных покрытий из алюминия, оловянистой бронзы и меди механическим путем на поверхность закаленных чугуновых зубчатых колес с внешним диффузионным ванадиевым покрытием взамен операции тонкого шлифования, для сглаживания исходной шероховатости поверхности [8].

В зарубежной литературе большой объем исследований направлен на поиск методов и средств уменьшения времени приработки [9], т. к. таким образом стремятся научиться управлять упругими свойствами поверхностей. Исследуется изменение коэффициента трения

в период приработки [10]. Строятся численные [11] и аналитические [12] модели приработки.

Целью настоящей статьи является уменьшение времени приработки поверхностей трения.

### Методы и средства

Исследования проводили на образце, изготовленном из стали 45, поверхности образца обрабатывали шлифованием до шероховатости  $Ra = 1,0$  мкм. Шероховатость образцов измерялась на профилографе БВ7669М на базовой длине 0,8 мм, в трех измерениях. Химический анализ поверхности проводили на спектрометре Искролайн-100, металлографию осуществляли на микроскопе LeicaDM, предварительно обработав поверхность 3,0 %-ным спиртовым раствором азотной кислоты. В качестве контртела выступала сталь 40Х с качеством поверхностей  $Ra = 1,0$  мкм.

Отжиг образцов проводили в муфельной печи. Печь разогревалась до температуры 180 °С, образцы, обсыпанные порошкообразным диоксидом кремния, помещали в печь и выдерживали в течении 30 мин. Остывание образцов происходило в печи при открытой дверце. Более детально методика проведения отжига приведена в работе [13].

Испытания на износ проводили по

схеме цилиндр-плоскость. Испытания проводили без смазочного материала, при нагрузке 30 Н. Скорость вращения цилиндрического образца 60 об/мин, продолжительность испытаний 4,0 мин. Радиус контртела  $R = 25$  мм.

### Результаты и обсуждение

Сравнение проводили по двум образцам: первый образец – не отожженный в печи; второй образец – отожженный в печи. Результаты измерения параметров шероховатости образцов приведены на рис. 1 и в табл. 1.

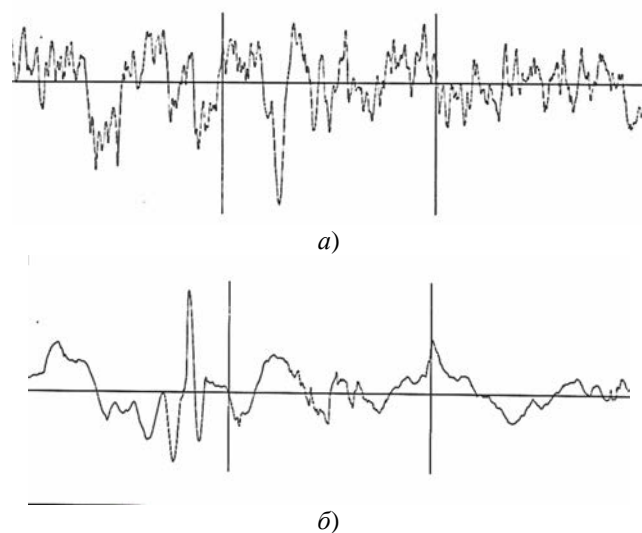


Рис. 1. Профиль поверхности образца: *a* – первый образец; *b* – второй образец

Fig. 1. Surface profile of the sample: *a* – the first sample; *b* – the second sample

## 1. Средние значения параметров шероховатости поверхности по трем измерениям

### 1. The average values of the surface roughness parameters in three dimensions

Параметр	Первый образец	Второй образец
$Ra$ , мкм	0,993	0,220
$Rz$ , мкм	3,701	–
$R_{max}$ , мкм	5,942	1,163
$S_m$ , мм	0,073	0,167
$S$ , мм	0,013	0,008
$t_{50}$ , %	68,50	52,20

Как видно из табл. 1 высотные параметры шероховатости уменьшились: параметр  $Ra$  в 4,5 раза; параметр  $R_{max}$  – в 5,1 раза. Шаговые параметры повели себя разнонаправленно: параметр  $S_m$  увеличился в 2,2 раза; параметр  $S$  уменьшился в 1,6 раза. Уменьшение высотных  $Ra$ ,  $R_{max}$  и увеличение шаговых  $S_m$  параметров шероховатости свидетельствует о выглаживании поверхности в следствии проведенного отжига. Уменьшение параметра  $S$

говорит об общем уменьшении количества выступов шероховатости. Также следует отметить уменьшение значения параметра опорной кривой профиля  $t50$ , как характеристики уменьшения несущей способности материала.

Испытания образцов на износ (рис. 2) позволили установить, что, в целом, выглаживание поверхности привело к уменьшению износа.

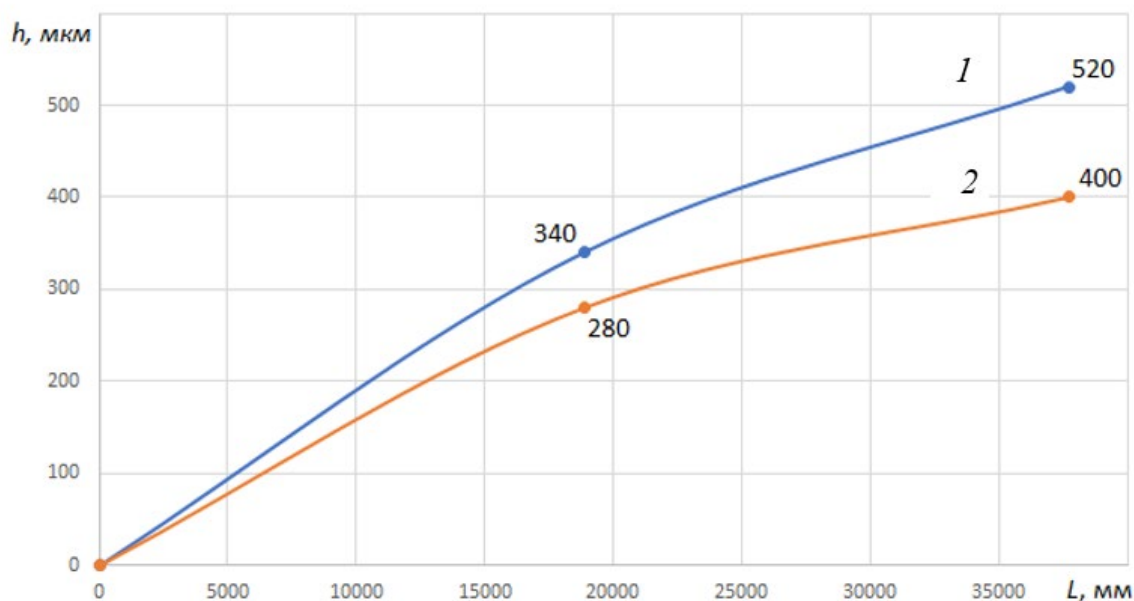


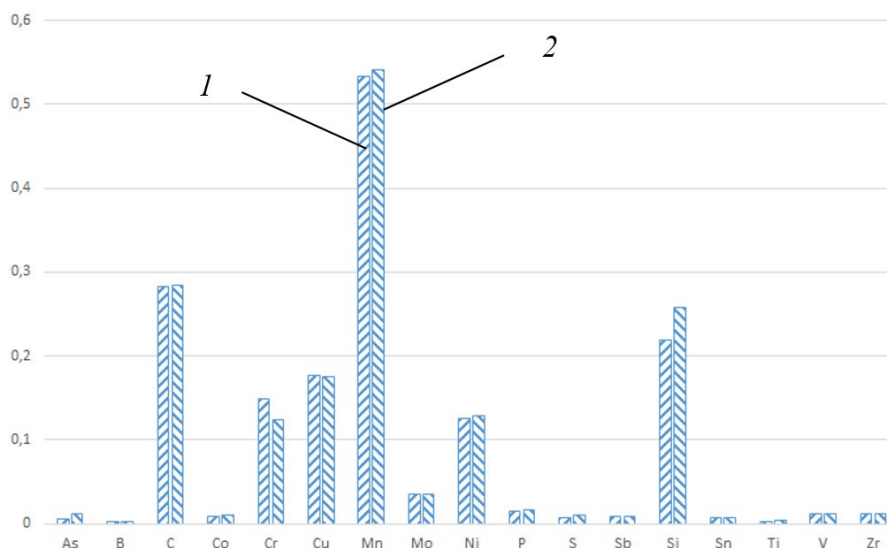
Рис. 2. Результаты испытания на износ пары трения с образцами:  
1 – первый образец; 2 – второй образец

Fig. 2. The results of the friction pair wear test for samples:  
1 – the first sample; 2 – the second sample

Так, износ пары трения с первым образцом составил 0,52 мм, со вторым образцом – 0,4 мм. Интенсивность изнашивания пары трения с первым образцом –  $1,38 \cdot 10^{-5}$ , со вторым образцом –  $1,06 \cdot 10^{-5}$ . Следовательно, можно прийти к заключению, что процесс приработки второго образца завершится быстрее, чем у первого.

Проведенный химический анализ образцов (рис. 3) показал, что в поверхностном

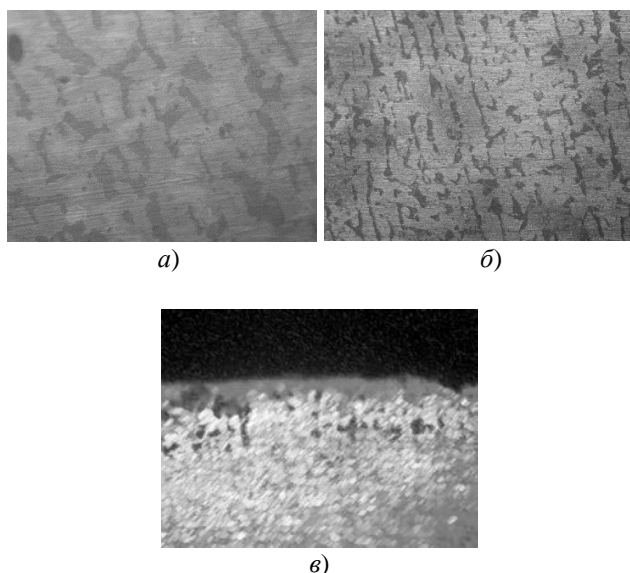
слое второго образца после отжига в порошке диоксида кремния увеличилось количество кремния в 1,18 раз и уменьшилось содержание хрома в 0,18 раз. Увеличение содержания кремния можно объяснить его переходом из диоксида кремния в поверхностный слой стали. Объяснить потерю хрома можно его расходом на возникающую химическую реакцию  $Cr + SiO_2 = CrO + SiO_2$ . Однако, данное предположение требует дополнительно подтверждения.



**Рис. 3. Содержание химических элементов в образцах:**  
1 – первый образец; 2 – второй образец

**Fig. 3. The content of chemical elements in the samples:**  
1 – first sample; 2 – second sample

На металлографии второго образца (рис. 4, в) виден образовавшийся поверхностный слой. При этом, изначальная структура поверхности первого образца (рис. 4, а) после отжига (рис. 4, б) практически не претерпела изменений.



**Рис. 4. Структура поверхности:**  
а – первый образец (×500); б – второй образец (×500);  
в – срез торца второго образца (×200)

**Fig. 4. Surface structure:**  
а – the first sample (×500); б – the second sample (×500);  
с – end face cut of the second sample (×200)

## Выводы

Низкотемпературный отжиг в порошкообразном диоксиде кремния позволяет «сгладить» микронеровности поверхности. В результате на поверхности образуется слой, содержащий кремний или его карбиды. Интенсивность изнашивания при этом уменьшается, что приведет к уменьшению времени приработки.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нагоркин М.Н., Федоров В.П., Суслов А.Г., Тотай А.В. Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 37–45. DOI 10.30987/2223-4608-2023-37-45. EDN QFJRDD.
2. Тотай А.В. Повышение эксплуатационной надежности деталей технологическим управлением физико-химическими параметрами их поверхностных слоев // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 1(103). С. 24–30. DOI 10.30987/2223-4608-2020-1-24-30. EDN WRAIUI.
3. Пыриков И.Л. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств плоских поверхностей скольжения // Научные технологии в

машиностроении. 2021. № 1(115). С. 15–23. DOI 10.30987/2223-4608-2020-2021-1-15-23. EDN NPWXVY.

4. **Войтов В.А., Бекиров А.Ш., Войтов А.В., Цымбал Б.М.** Методика приработки трибосистем и экспериментальная проверка ее эффективности // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 5. С. 487–497. EDN XNTCSA.

5. **Волченков А.В., Никитина Л.Г.** Алгоритм разработки программы приработки криволинейных поверхностей // Транспортное машиностроение. 2023. № 2(14). С. 12–18. DOI 10.30987/2782-5957-2023-2-12-18. EDN CQFMSY.

6. **Цуканов И.Ю., Щербакова О.О., Мезрин А.М. и др.** Трибологические характеристики и микрогеометрия поверхностей антифрикционных сплавов в период приработки // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 1. С. 19–26. EDN OCNFBR.

7. **Буковский П.О., Морозов А.В., Кириченко А.Н.** Влияние приработки на коэффициент трения углеродных композитных материалов авиационных тормозов // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 4. С. 448–456. DOI 10.32864/0202-4977-2020-41-4-448-456. EDN SLHWRN.

8. **Веселовский А.А.** Влияние внешних антифрикционных покрытий на состояние поверхности и приработку упрочненных диффузией чугуновых зубчатых колес в паре // Вестник Курганской ГСХА. 2020. № 2(34). С. 58–61. EDN ZGBMWG.

9. **Jeng, Yeau-Ren, Zhi-Way Lin, and Shiuh-Hwa Shyu.** «Changes of surface topography during running-in process». J. Trib. 126.3 (2004): 620–625.

10. **A. Ruggiero, G. D. Leo, C. Liguori, D. Russo and P. Sommella.** «Accurate Measurement of Reciprocating Kinetic Friction Coefficient Through Automatic Detection of the Running-In», in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 5, pp. 2398–2407, May 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.2974055.

11. **Rifky Ismail, Muhammad Tauviquirrahman, Jamari, Dirk J. Schipper.** Two-Dimensional Finite Element Analysis on Running-in of Elastic-Plastic Rolling Contact. AIP Conf. Proc. 23 December 2010; 1325 (1): 190–193. <https://doi.org/10.1063/1.3537894>

12. **Akbarzadeh, Saleh, and M. M. Khonsari.** «Experimental and theoretical investigation of running-in». Tribology International 44.2 (2011): 92–100.

13. **Суслов А.Г., Шалыгин М.Г.** Управление наногометрией деталей методом поверхностного упрочнения // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 11. С. 38–41.

## REFERENCES

1. Nagorkin M.N., Fedorov V.P., Suslov A.G., Totai A.V. Technological control of surface operational roughness parameters for sliding friction pairs through combined antifriction surfacing // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, No. 12 (150), pp. 37–45. DOI 10.30987/2223-4608-2023-37-45. EDN QFJRDD.

2. Totai A.V. Increase of parts operation reliability by technological control of physical-chemical parameters of their surface layers // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2020, No. 1(103), pp. 24–30. DOI 10.30987/2223-4608-2020-2020-1-24-30. EDN RYKI.

3. Pyrikov I.L. Technological support of operation properties in flat sliding surfaces // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, No. 1(115), pp. 15–23. DOI 10.30987/2223-4608-2020-2021-1-15-23. EDN NPWXVY.

4. Voitov V.A., Bakirov A.Sh., Voitov A.V., Tsymbal B.M. Tribosystem aging technique and experimental proof of its effectiveness // Friction and wear, 2019, vol. 40, No. 5, pp. 487–497. EDN XNTCSA.

5. Volchenkov A.V., Nikitina L.G. Algorithm for developing the program of curved surfaces burn-in // Transport engineering, 2023, No. 2(14), pp. 12–18. DOI 10.30987/2782-5957-2023-2-12-18. EDN CQFMSY.

6. Tsukanov I.Yu., Shcherbakova O.O., Mezrin A.M. et al. Tribological characteristics and microgeometry of surfaces of antifriction alloys in the running-in period // Friction and wear, 2020, vol. 41, No. 1, pp. 19–26. EDN OCNFBR.

7. Bukovsky P.O., Morozov A.V., Kirichenko A.N. Influence of running-in on the friction coefficient of C/C composite materials for aircraft brakes // Friction and wear, 2020, vol. 41, No. 4, pp. 448–456. DOI 10.32864/0202-4977-2020-41-4-448-456. EDN SLHWRN

8. Veselovsky A.A. Effect of external anti-friction coatings on the surface condition and running-in of diffusion-hardened cast-iron toothed gears in a pair // Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy, 2020, No. 2(34), pp. 58–61. EDN ZGBMWG.

9. Jeng, Yeau-Ren, Zhi-Way Lin, and Shiuh-Hwa Shyu. «Changes of surface topography during running-in process». J. Trib. 126.3 (2004): 620–625.

10. **A. Ruggiero, G. D. Leo, C. Liguori, D. Russo and P. Sommella.** «Accurate Measurement of Reciprocating Kinetic Friction Coefficient Through Automatic Detection of the Running-In», in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 5,



pp. 2398–2407, May 2020,  
doi: 10.1109/TIM.2020.2974055.

11. Rifky Ismail, Muhammad Tauviquirrahman, Jamari, Dirk J. Schipper. Two-Dimensional Finite Element Analysis on Running-in of Elastic-Plastic Rolling Contact. AIP Conf. Proc. 23 December 2010; 1325 (1): 190–193. <https://doi.org/10.1063/1.3537894>

12. Akbarzadeh, Saleh, and M. M. Khonsari. «Experimental and theoretical investigation of running-in». Tribology International 44.2 (2011): 92–100.

13. Suslov A.G., Shalygin M.G. Control of nanogeometry of parts by the method of surface hardening / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, No.1(127), pp. 38–41.

**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 08.02.2024; одобрена после рецензирования 15.02.2024; принята к публикации 24.02.2024.

The article was submitted 08.02.2024; approved after reviewing 15.02.2024; accepted for publication 24.02.2024.

---

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](mailto:naukatm@yandex.ru), [editntm@yandex.ru](mailto:editntm@yandex.ru)

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

Сдано в набор 17.03.2024. Выход в свет 29.03.2024.

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

