

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**№ 5 (143)**

**2023**

Издается с июля 2011 г.

**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей**

## Главный редактор

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

## Зам. главного редактора

д.т.н., доцент 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., доц. 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., проф., акад. НАН Беларуси

МЫШКИН Н.К., (г. Гомель, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

к.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 МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

**Базров Б.М.** Определение потребностей в технологическом оснащении  
производства деталей . . . . . 3

**Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В.** Особенности  
проектирования инструмента для физического моделирования процесса  
шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес . . . . . 8

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Шерина Ю.В., Луц А.Р., Кичаев П.Е., Богатов М.В., Амосов А.П.**  
Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана  
и последующей термической обработки на структуру и  
свойства сплава АМгб. . . . . 15

**Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х.,  
Мищенко В.И.** Влияние режимов плазменного напыления порошка оксида  
алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия. . . . . 22

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

**Лебедев В.А., Тороп Ю.А., Кочетов А.Н., Коваль Н.С.** Оценка влияния  
ультразвуковых колебаний на напряженное состояние поверхностного  
слоя отверстия, обработанного методом калибрования. . . . . 33

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН

**Сундуков С.К.** Применение ультразвуковых технологий при получении  
прессовых соединений. . . . . 40

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

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

# SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

**№ 5 (143)**

**2023**

**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., assoc. 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., prof. 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)

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Subscription index: **379195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

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

## CONTENTS

### TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

**Bazrov B.M.** Determining demands of parts production techniques . . . . . 3

**Malikov A.A., Sidorkin A.V., Kovalev Yu.V.** Peculiarities of tool design for  
physical modeling of shaving-rolling cylindrical gear-wheels . . . . . 8

### MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

**Sherina Yu.V., Lutz A.R., Kichaev P.E., Bogatov M.V., Amosov A.P.** The effect  
of reinforcement with a titanium carbide high-dispersity phase and subsequent heat  
treatment on the structure and properties of the AMg6 alloy. . . . . 15

**Soloviev M.E., Raukhvager A.B., Baldaev S.L., Baldaev L.K., Mischenko V.I.**  
Influence of conditions of plasma spraying of aluminum oxide powder on the  
porosity and electrical resistance of a coating. . . . . 22

### TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

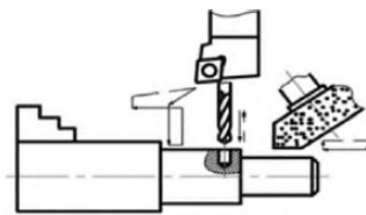
**Lebedev V.A., Torop Yu. A., Kochetov A.N., Koval N.S.** Impact assessment  
of ultrasonic vibrations on the stress state of the hole surface layer when treated  
by the calibration method . . . . . 33

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MACHINE ASSEMBLY

**Sundukov S.K.** Application of ultrasonic technologies in the production  
of press joints . . . . . 40

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 3-7.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 3-7.

Научная статья  
УДК 621.9  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-7

## Определение потребностей в технологическом оснащении производства деталей

**Борис Мухтарбекович Базров**, д.т.н.  
ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
Российской академии наук, Москва, Россия  
modul\_lab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3297-9818>

***Аннотация.** Актуальным является определение потребностей в средствах технологического оснащения (СТО) на этапе принятия производственной программы. Предлагается для решения этой задачи воспользоваться принципами модульной технологии, так как на практике определение потребностей в СТО осуществляется по результатам технологической подготовки производства.*

**Ключевые слова:** станок, инструмент, приспособление, измерительные средства, модуль, производство

**Для цитирования:** Базров Б.М. Определение потребностей в технологическом оснащении производства деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 3–7. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-7

## Determining demands of parts production techniques

**Boris M. Bazrov**, D.Eng.  
Federal Budget-Funded Research Institute for Machine Science named after A.A. Blagonavov of the Russia  
Academy of Sciences, Moscow, Russia  
modul\_lab@mail.ru

***Abstract.** The major aspect of determining demands of jigs, fixtures and tools (JFT) at the stage of adoption of the production program is of the current importance. It is suggested to use a module technology principle for solving this problem, since in practice JFT determining demands are based on the results of manufacturing process design.*

**Keywords:** machine, tool, device, measuring tools, module, production

**For citation:** Bazrov B.M. Determining demands of parts production techniques / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 3–7. doi:10.30987/2223-4608-2023-3-7

В качестве исполнителя производственной программы может выступать или действующее предприятие, или предприятие, создаваемое под заданную производственную программу.

В первом случае задачей является определение возможности выполнения производственной программы имеющимися средствами технологического оснащения (СТО), а именно технологического оборудования, оснастки, как по номенклатуре, так и по их количеству.

Во втором случае задачей является определение необходимых СТО для выполнения заданной производственной программы.

Таким образом, в обоих случаях требуется определение потребностей в СТО.

На практике для снижения трудоемкости технологической подготовки производства (ТПП) и сроков запуска производства используют приведенную производственную программу, что снижает точность в определении потребностей в СТО [1, 2]. Применение приведенной производственной программы при определении потребностей в СТО приводит к значительным ошибкам.

Неточность в определении потребностей в СТО может привести или к отсутствию некоторых СТО, необходимых для выполнения производственной программы, или к их

избытку, что снижает эффективность производства.

Таким образом, актуальной задачей является повышение точности в определении потребностей в технологическом оснащении для выполнения производственной программы на этапе ее принятия.

Для повышения точности определения потребностей в СТО предлагается воспользоваться принципами модульной технологии, где деталь представляется совокупностью модулей поверхности (МП) [3].

Ее применение требует наличия элементной базы средств технологического обеспечения (ЭБТО) на модульном уровне, отражающей связи между МП детали и модулями средств их технологического обеспечения: МТО; МО; МИ; МТБ; МПр; МКУ (рис. 1).

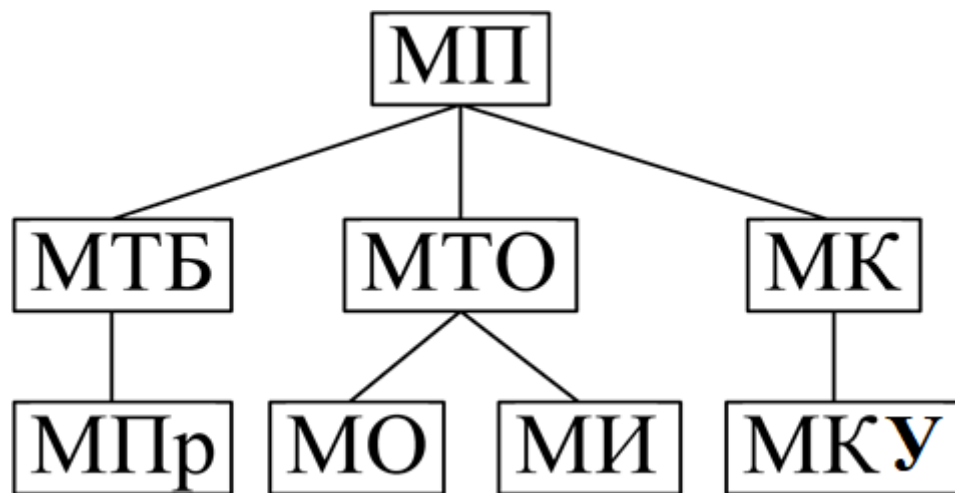


Рис. 1. Схема связей модулей средств технологического обеспечения

Каждому модулю поверхности с его характеристиками соответствует модуль технологического процесса его изготовления (МТО) и соответствующий ему модуль станка (МО); модуль инструментальной наладки (МИ); модуль контрольно-измерительного устройства (МКУ); модуль технологических баз (МТБ), модуль приспособлений (МПр), что следует из рис. 1.

Отсюда следует, что, зная номенклатуру и количество изготавливаемых МП, составляющих детали производственной программы, можно определить с высокой точностью потребности станков, обрабатывающего инструмента и контрольно-измерительных средств.

Методика определения потребностей в СТО для выполнения производственной программы включает следующие этапы:

- выполнение эскизов деталей с указанием МП;
- представление производственной программы на уровне МП;
- идентификацию станков под изготовление МП с учетом их размеров и уровня точности, станочных приспособлений, инструментальных наладок и контрольно-измерительных средств.

Представление производственной программы на уровне МП осуществляется следующим образом:

1. Сначала деталь каждого наименования представляется совокупностью МП.

2. Затем строится гистограмма распределения МП каждой детали, где указывается количество каждого наименования МП в соответствии с производственной программой.

3. В итоге строится сводная гистограмма распределения МП всех наименований деталей и количества их выпуска. При построении гистограмм должны уточняться характеристики МП: указывается полный или неполный МП, диапазоны характеристик каждого МП.

4. Далее проводится идентификация средств технологического оснащения, начиная со станков.

Идентификация применяемого традиционного станка по изготовлению МП проводится в следующей последовательности:

1. Определяются характеристики станка: методы обработки, реализуемые на станке, применяемый обрабатывающий инструмент, технические характеристики станка.

2. Далее определяются изготавливаемые на станке виды поверхностей и их характеристики (форма, размеры, уровень точности). На

основе их анализа определяются виды МП, поверхности которых входят в состав поверхностей, изготавливаемых на станке, а, следовательно, виды МП, которые можно изготовить на станке.

3. После этого проводится проверка на возможность изготовления всех поверхностей МП с учетом их расположения в рабочем пространстве станка.

4. Затем определяются характеристики этих МП: диапазоны размеров и уровень точности в соответствии с точностью станка.

В качестве примера идентификации традиционных станков были рассмотрены такие станки, как токарно-винторезный, токарный обрабатывающий центр, вертикально-сверлильный станок и консольно-фрезерный горизонтальный станок, и модули МП, которые могут быть на них изготовлены [4].

Результаты их идентификации приведены в табл. 1, из которой видно, что из 26 видов модулей поверхности на токарно-винторезном станке можно изготавливать 20 видов, на токарном обрабатывающем центре все 26 видов, на вертикально-сверлильном станке 7 видов и на консольно-фрезерном горизонтальном станке 13 видов.

**1. Изготавливаемые на станке модули поверхности**

№	Станок	Изготавливаемые модули поверхности																									
		Б11	Б12	Б211	Б212	Б221	Б222	Б311	Б312	Б321	Б322	Б41	Б42	Б51	Б52	Р111	Р112	Р121	Р122	Р21	Р22	С111	С112	С121	С122	С21	С22
1	Токарно-винторезный			x	x	x	x					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	Токарный обрабатывающий центр	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	Вертикально-сверлильный			x		x						x				x		x				x		x			
4	Консольно-фрезерный горизонтальный	x	x							x				x	x	x	x			x	x	x	x			x	x

При этом в паспортных данных станка должны быть указаны характеристики изготавливаемых видов МП.

После идентификации традиционного станка должно указываться его технологическое сопровождение, включающее изготавливаемые виды МП с их характеристиками, а также МТО, МИ, МКУ и модули управляющих программ (МУП) под осуществление МТО.

Поскольку МТО содержит информацию о затратах времени на изготовление МП, это позволяет определить трудоемкость изготовления деталей по оперативному времени и потребное количество станков каждого наименования.

Теперь становится возможным определение номенклатуры станков, способных изготавливать все МП согласно производственной программе.

Из этой группы станков следует взять станки с учетом габаритных размеров заготовок детали.

В итоге определяется гамма станков, обеспечивающих выполнение номенклатуры МП в соответствии с производственной программой.

Следующим этапом является определение количества станков каждого наименования с учетом объема выпуска деталей.

Далее уточняются потребности в количестве станков каждого наименования в зависимости от технологических операций и организации производственного процесса: последовательности рабочих мест и их количества, маршрутов движения заготовок по рабочим местам.

Определение потребностей в МИ производится следующим образом. Наличие информации о МП и изготавливаемых ими МТО позволяет определить потребности в МИ. При этом надо отметить, что с помощью каждого МТО изготавливается группа МП с соответствующими диапазонами их характеристик. Принимая во внимание всё разнообразие МТО и возможность использования одного МИ для осуществления нескольких МТО определяется требуемое разнообразие МИ. Поскольку МИ это совокупность обрабатывающего инструмента становится возможным определение потребностей в обрабатывающем инструменте по номенклатуре. Принимая во внимание

стойкость обрабатывающего инструмента и количество изготавливаемых с их помощью МП становится возможным определить потребности не только их номенклатуры, но и количество каждого их наименования.

Наличие информации о номенклатуре и количестве МКУ позволяет определить потребности в контрольно-измерительных средствах. При этом надо иметь в виду, что если для контроля МП применяются универсальные контрольно-измерительные средства, то в этом случае также, как и при применении традиционных станков требуется проведение их идентификации. В результате их идентификации определяются те виды МП с диапазонами их характеристик, которые могут быть проконтролированы этими средствами.

В остальных случаях устанавливается потребность в приобретении или разработке контрольно-измерительных средств, необходимых для контроля остальных МП.

К сожалению, определение потребностей в станочных приспособлениях на этапе принятия производственной программы не представляется возможным, т. к. они определяются после разработки технологических процессов изготовления деталей, где указываются схемы базирования заготовок на операциях.

### **Выводы**

1. При принятии производственной программы важно определить потребности в СТО с целью возможности ее выполнения.
2. На практике потребности в СТО определяются только по результатам проведения технологической подготовки производства.
3. Определение потребностей в СТО при использовании приведённой производственной программы приводит к большим ошибкам.
4. Предлагается для определения потребностей в СТО на этапе принятия производственной программы воспользоваться принципами модульной технологии и представить производственную программу на модульном уровне – в виде совокупности МП, как по номенклатуре, так и по количеству каждого наименования.
5. Решение этой задачи требует идентификации СТО под изготовление и контроль МП.

6. Зная номенклатуру МТО, МО, МИ и производственную программу на уровне МП, можно определить потребности в станках, обрабатывающем инструменте и контрольно-измерительных средствах для выполнения производственной программы.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Вороненко В.П.** Проектирование машиностроительного производства: учебник / В.П. Вороненко, М.С. Чепчуров, А.Г. Схиртладзе; под ред. В.П. Вороненко. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 416 с.
2. **Сибикин М.Ю., Сибикин Ю.Д.** Основы проектирования машиностроительных предприятий: учебное пособие. Изд. 3-е, стер. М., Берлин: Директ-Медиа, 2020. 260 с.
3. **Базров Б.М.** Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с.

4. **Сахаров А.В.** Определение технологических возможностей токарного обрабатывающего центра / А. В. Сахаров, Н.А. Родионова // Станкоинструмент. 2019. № 4 (17). С. 36–41.

### REFERENCES

1. Voronenko V.P. Design of machine-building production: textbook / V.P. Voronenko, M.S. Chepchurov, A.G. Skhirtladze; edited by V.P. Voronenko. 2nd ed., RP. Saint Petersburg: Lan, 2019. 416 p. (in Russian)
2. Sibikin M.Yu., Sibikin Yu.D. Fundamentals of engineering enterprises design: textbook. – 3-rd ed., RP. Moscow; Berlin: Direct-Media, 2020. 260 p. (in Russian).
3. Bazrov B.M. Modular technology in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 368 p. (in Russian).
4. Sakharov A.V., Rodionova N.A. Determination of technological possibilities of a turning machining center. Stankinstrument, 2019, no. 4 (17), pp. 36–41.

Статья поступила в редакцию 15.03.2023; одобрена после рецензирования 21.03.2023; принята к публикации 30.03.2023

The article was submitted 15.03.2023; approved after reviewing 21.03.2023; assepted for publication 30.03.2023



Научная статья

УДК 621.941.01

doi: 10.30987/2223-4608-2023-8-14

## Особенности проектирования инструмента для физического моделирования процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес

Андрей Андреевич Маликов<sup>1</sup>, д.т.н.,

Андрей Викторович Сидоркин<sup>2</sup>, к.т.н.,

Юрий Вячеславович Ковалев<sup>3</sup>, аспирант

<sup>1, 2, 3</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>1</sup> tppizi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6757-5584>

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

<sup>3</sup> y@vkvov.me, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Рассмотрены аспекты проектирования специальной конструкции комбинированного режущо-деформирующего инструмента для изучения основных характеристик протекания процесса чистовой зубообработки цилиндрических колес шевингованием-прикатыванием. Существенное внимание уделено вопросам формообразования основных режущих элементов инструмента и возможности его изготовления в условиях современного инструментального производства. Обоснована необходимость использования цельной конструкции инструмента в разрезе его работы по аналогии с процессом точения.

**Ключевые слова:** шевингование-прикатывание, цилиндрические колеса, процесс, инструмент, резец, проектирование, твердотельное моделирование

**Для цитирования:** Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В. Особенности проектирования инструмента для физического моделирования процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 8–14. doi: 10.30987/2223-4608-2023-8-14

## Peculiarities of tool design for physical modeling of shaving-rolling cylindrical gear-wheels

Andrey A. Malikov<sup>1</sup>, D. Eng., Andrey

V. Sidorkin<sup>2</sup>, PhD. Eng.,

Yuri V. Kovalev<sup>3</sup>, PG student

<sup>1, 2, 3</sup> Tula State University, Tula, Russia

<sup>1</sup> tppizi@yandex.ru,

<sup>2</sup> alan-a@mail.ru,

<sup>3</sup> y@vkvov.me

**Abstract.** Projection aspects of a combined cutting and deforming tool special design for studying the main characteristics of finishing gear-working of shaving-rolling cylindrical gear wheels. Large focus is given to the issues of shaping the main cutting elements of the tool and the possibility of its manufacture in the conditions of modern tool production. The necessity of using an integral tool design in the context of its operation in a manner similar to the turning process is substantiated.

**Keywords:** shaving-rolling on, cylindrical wheels, process, tool, cutter, design, solid modeling

**For citation:** Malikov A.A., Sidorkin A.V., Kovalev Yu.V. Peculiarities of tool design for physical modeling of shaving-rolling cylindrical gear-wheels / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 8–14. doi: 10.30987/2223-4608-2023-8-14

### Введение

В Тульском государственном университете на протяжении последних десятилетий

серьезное внимание уделяется аспектам построения высокопроизводительных ресурсосберегающих процессов комбинированной



(режуще-деформирующей) чистой и отделочной зубообработки цилиндрических зубчатых колес (ЦЗК). В многочисленных работах профессоров Е.Н. Валикова, А.С. Ямникова, О.И. Борискина и их учеников, в частности [1 – 3], отмечается высокая эффективность процесса шевингования-прикатывания для чистой стадии зубообработки при обеспечении стабильно высоких точностных и качественных параметров венцов, обрабатываемых ЦЗК.

Дальнейшее экспериментальное исследование рассматриваемого процесса подразумевает обработку партий из нескольких тысяч ЦЗК с использованием специализированного технологического оборудования, что в условиях современных реалий, в рамках чисто академического исследования (проводимого на кафедре вуза без какой-либо поддержки со стороны промышленных предприятий), представляется малоосуществимым. Следовательно,

физическое моделирование процесса шевингования-прикатывания ЦЗК в процессе точения, при использовании метода аналогии в кинематике и режимах резания, позволяет с высокой степенью точности изучить ход протекания процесса комбинированной чистой зубообработки и механизм износа зубьев режуще-деформирующего инструмента, задействованного в нем [4].

### Основные принципы и граничные условия построения модели

Для реализации моделирования необходимо спроектировать специальный инструмент – резец, целиком выполняемый, по аналогии с шевром-прикатником, из быстрорежущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73), закаляемый до твердости 60...65 HRC [3] и имитирующий один из его режущих зубьев (рис. 1).

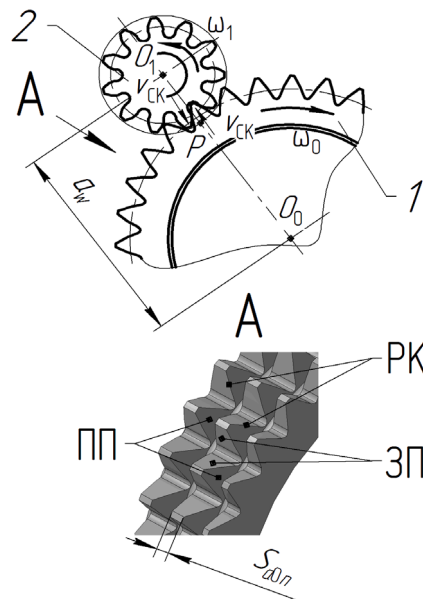


Рис. 1. Схема зубообработки ЦЗК шевингованием-прикатыванием и полутоновой фрагмент аксонометрии комбинированного инструмента:

$1$  – инструмент;  $2$  – обрабатываемое ЦЗК;  $P$  – полюс зацепления;  $a_w$  – номинальное межосевое расстояние;  $\omega_1$  и  $\omega_0$  – угловые скорости обрабатываемого ЦЗК и инструмента;  $v_{ск}$  – скорость скольжения боковых поверхностей зубьев;  $S_{дл}$  – толщина зуба на окружности вершин инструмента; РК – режущие кромки; ПП – передние поверхности; ЗП – задние поверхности

Воспользовавшись методами курса «Начертательная геометрия» [5] и возможностями системы графического моделирования, предоставляемыми, например САПР «Компас» фирмы «АСКОН», можно составить схему для определения положения и координат точек сечений передних поверхностей резца во вспомогательных плоскостях – нижней (н.п.) и

верхней (в.п.) (рис. 2). Данные плоскости, для удобства дальнейших построений, можно считать равноудаленными, соответственно, от основной плоскости резца и его плоскости прижима на расстоянии  $\Delta H$  (для рассматриваемого примера  $\Delta H$  удобно принять равному 1,0 мм) и параллельными им.

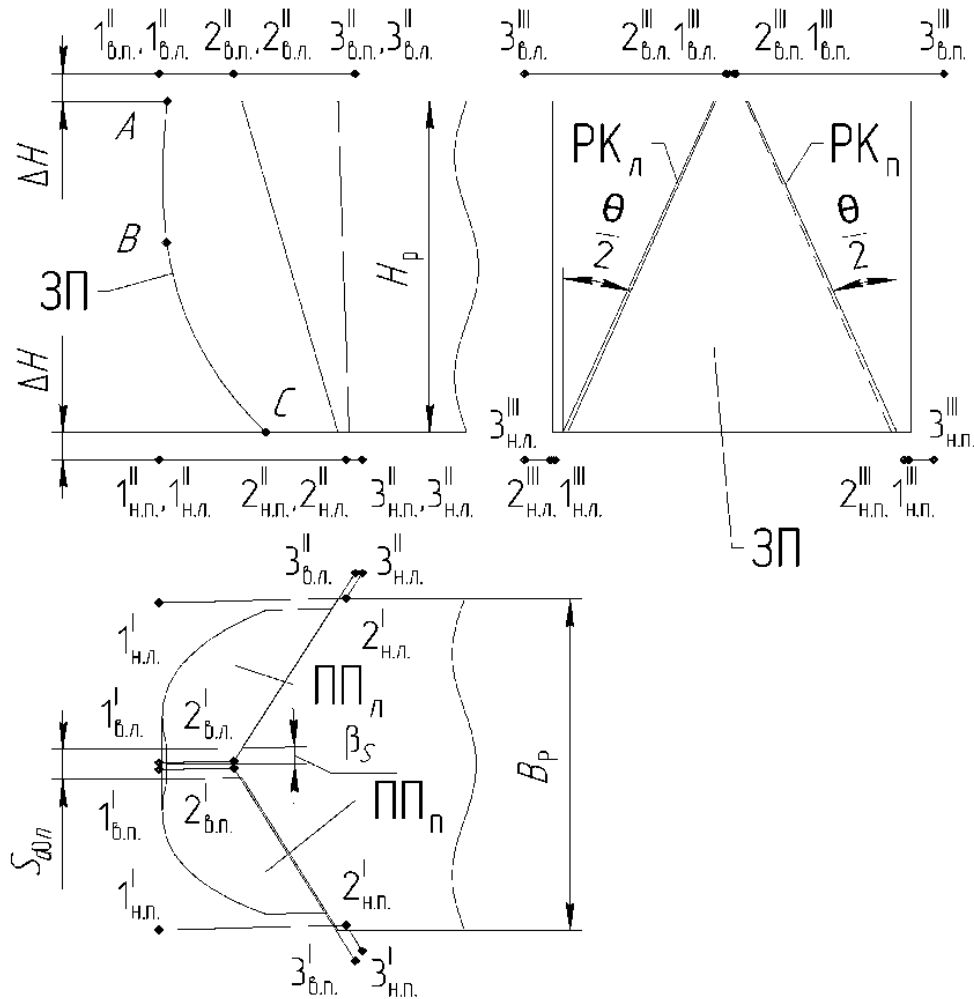


Рис. 2. Схема определения координат точек сечений передних поверхностей резца во вспомогательных плоскостях н.п. и в.п.

Рабочий участок  $AB$ , профилирующий заднюю поверхность (ЗП) очерчен боковой поверхностью эвольвентного профиля зуба инструмента (см. рис. 1). Нерабочий участок  $BC$  ЗП, в свою очередь, очерчен дугой окружности, плавно сопрягаемой с эвольвентой  $AB$ . Таким образом, задняя поверхность  $AC$  ограничивается основной плоскостью резца и параллельной ей плоскостью прижима.

Исходными параметрами для моделирования инструмента, помимо координат точек, формирующих эвольвентную заднюю поверхность  $AB$ , являются:

а) высота резца  $H_p$  (для рассматриваемого примера  $H_p = 12$  мм); ширина резца  $B_p$  (для рассматриваемого примера  $B_p = 12$  мм);

б) угол разворота правой (ПП<sub>п</sub>) и левой (ПП<sub>л</sub>) передних поверхностей резца  $\beta_s$  (для рассматриваемого примера  $\beta_s = 1^\circ 30'$ ) равный углу подъема винтовой стружечной канавки на

шевере-прикатнике и аналогичный углу  $\gamma$  для классического токарного резца;

в) толщина зуба инструмента на плоскости прижима, идентичная толщине зубьев шевера-прикатника на окружности вершин в направлении линии зуба  $S_{a0n}$ , которая в свою очередь зависит от шага винтовой линии стружечной канавки  $P_{винт}$ , угла наклона ее боковых стенок  $\theta$  [1, 3, 4] (для рассматриваемого примера при  $P_{винт} = 6$  мм;  $\theta = 45^\circ$ ,  $S_{a0n} = 1,08$  мм);

г) углы наклона правой РК<sub>п</sub> и левой РК<sub>л</sub> режущих кромок  $\theta/2$  инструмента (для рассматриваемого примера  $\theta/2 = 22^\circ 30'$ ), которые по своему функционалу аналогичны углу  $\lambda$  для классического токарного резца.

Кроме рассмотренных выше основных конструктивных параметров существует также и ряд вспомогательных:

а) углы скосов между передними поверхностями резца и его боковыми гранями (в горизонтальной плоскости), которые назначаются из

конструктивных соображений (для рассматриваемого примера принимаются равными  $60^\circ$ );

б) угол наклона линии скосов между передними поверхностями резца и его боковыми гранями (в вертикальной плоскости), которые назначаются из конструктивных соображений (для рассматриваемого примера принимается равным  $15^\circ$ ).

В результате графического моделирования в САПР получены координаты

точек:  $1_{в.п.}...3_{в.п.}$ ,  $1_{н.п.}...3_{н.п.}$ ;  $1_{в.л.}...3_{в.л.}$ ,  $1_{н.л.}...3_{н.л.}$ , задающие линии пересечения ПП<sub>п</sub>, ПП<sub>л</sub> и поверхностей правого и левого скосов с в.п. и н.п. Практическое значение имеют координаты точек и, соответственно, линии пересечения, построенные по ним в горизонтальной проекции эскиза. Указанные линии могут быть легко импортированы САПР «Компас-3D» (рис. 3) и использованы, наряду с линией  $AC$ , для создания твердотельной модели резца.

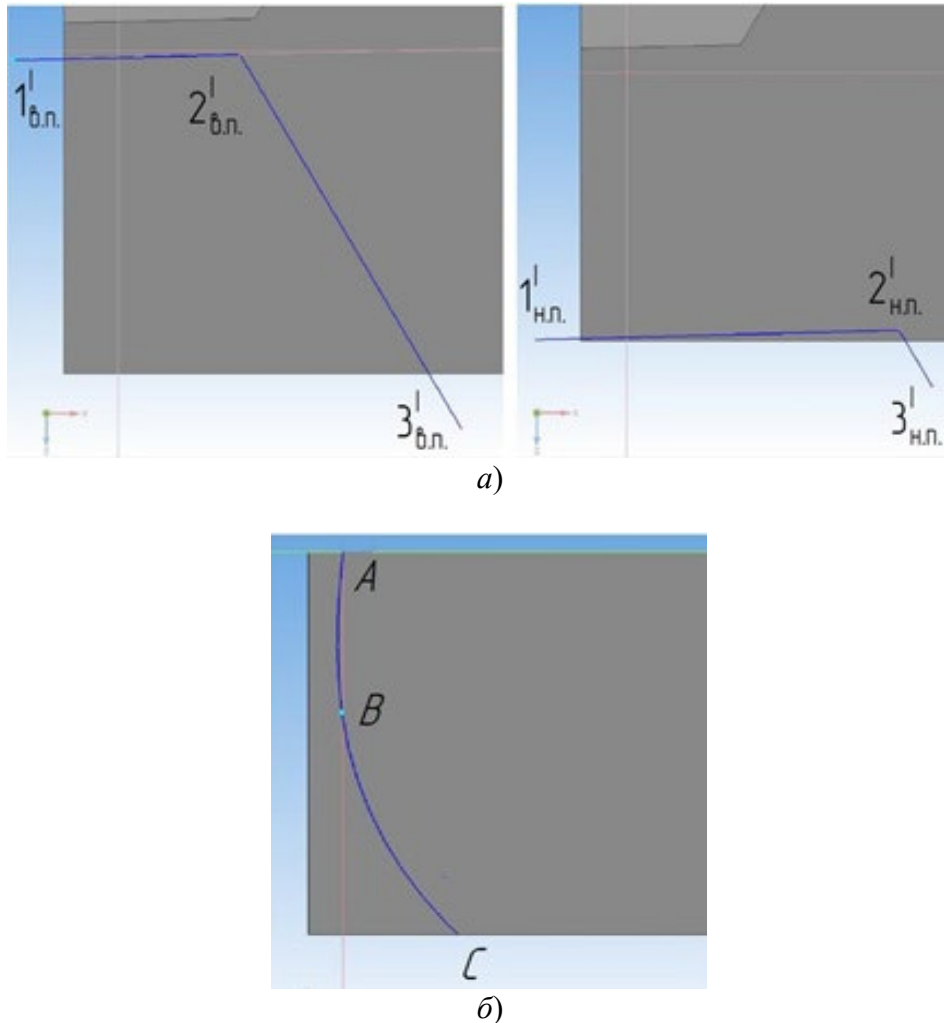


Рис. 3. Иллюстрация процедуры импортирования точек, определяющих положение правой передней поверхности инструмента и поверхности скоса (а), а также линии – задней поверхности (б), САПР «Компас-3D»

### Особенности процедуры твердотельного моделирования инструмента

Дерево построения модели, приведенное на рис. 4, позволяет наглядно проследить процедуру построения твердотельной модели инструмента. Первоначально в заданной пространственной системе координат выполняется построение прямоугольника и выдавливание прямоугольного параллелепипеда,

образующего тело цельного резца и имеющего размеры  $H_{рх}$ ,  $B_{рх}$ ,  $L_{р}$ .

Контур, очерчивающий заднюю поверхность инструмента, приводится в виде эскиза, по которому в дальнейшем происходит его вырезание из объема тела резца.

Введение дополнительных плоскостей н.п. и в.п. позволяет разместить в них линии пересечения передних поверхностей и скосов инструмента. Линии приводятся в отдельных

эскизах для правой и левой сторон инструмента. Двугранные углы переменного профиля, образованные пересечением плоскостей, образующих передние поверхности и скосы резца получаются путем реализации процедур «вырезания элемента выдавливанием». Так как рассматриваемые поверхности – линейчатые, необходимым и достаточным условием для их построения в пространстве является задание их линий пересечения с двумя плоскостями – н.п. и в.п.

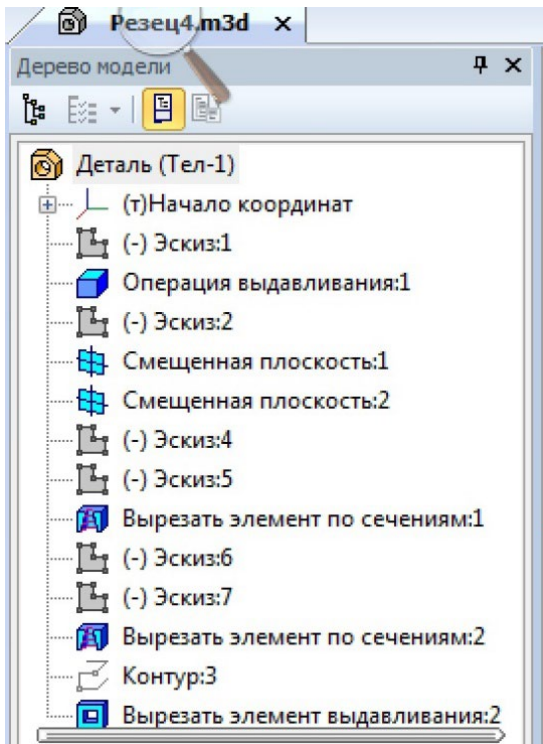


Рис. 4. Пример реализации дерева построения твердотельной модели инструмента в САПР «Компас-3D»

Результатом построения является твердотельная модель инструмента, приведенная на рис. 5. Ввиду того, что резец имеет небольшие габаритные размеры в поперечном сечении: для исследований, проводимых в лабораторных условиях достаточным можно считать габарит 12x12 мм [4, 6], его режущие элементы целесообразно получать методом электроэрозионной обработки на станке с ЧПУ, позволяющим добиться высокой точности геометрических параметров режущих элементов –  $\pm 2$  мкм и низкой их шероховатости  $Ra = 0,32$  мкм [7, 8]. Перед электроэрозионной обработкой тело резца – прямоугольный параллелепипед, предварительно обрабатывается резанием, закаливается и шлифуется по базовым поверхностям.

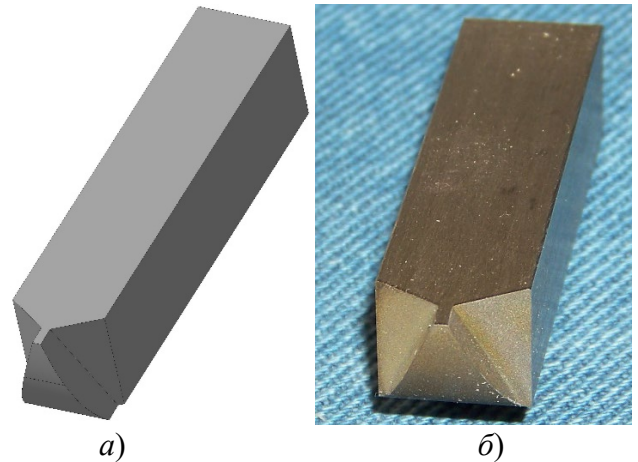


Рис. 5. Твердотельная модель (а) и фотография (б) полученного инструмента

### Основные выводы и результаты

При необходимости по твердотельной модели может быть построен стандартный двумерный графический документ (рис. 6), позволяющий произвести технологическую подготовку процесса изготовления резца в условиях инструментального производства. Графический документ содержит необходимые виды, имеет в своем составе дополнительный элемент – увеличенный профиль эвольвентной задней поверхности инструмента. Также в документе представлена таблица координат опорных точек рабочего эвольвентного участка задней поверхности. Указанные координаты позволяют осуществить сплайновую интерполяцию, удобную для подготовки управляющей программы при профильной электроэрозионной обработке задней поверхности резца.

Стоит отметить, что электроэрозионная обработка на станке с ЧПУ является, в данном случае, предпочтительной, так как при ней действует универсальное высокоточное оборудование, которым оснащаются современные инструментальные производства. Использование оптикошлифовальных станков на данной операции существенно повышает требования к квалификации рабочего, увеличивает трудоемкость изготовления инструмента и снижает точность и качество обработки. Применение шлифовальных станков с ЧПУ также затруднительно ввиду их дороговизны и относительно малой распространённости и доступности в инструментальном производстве.

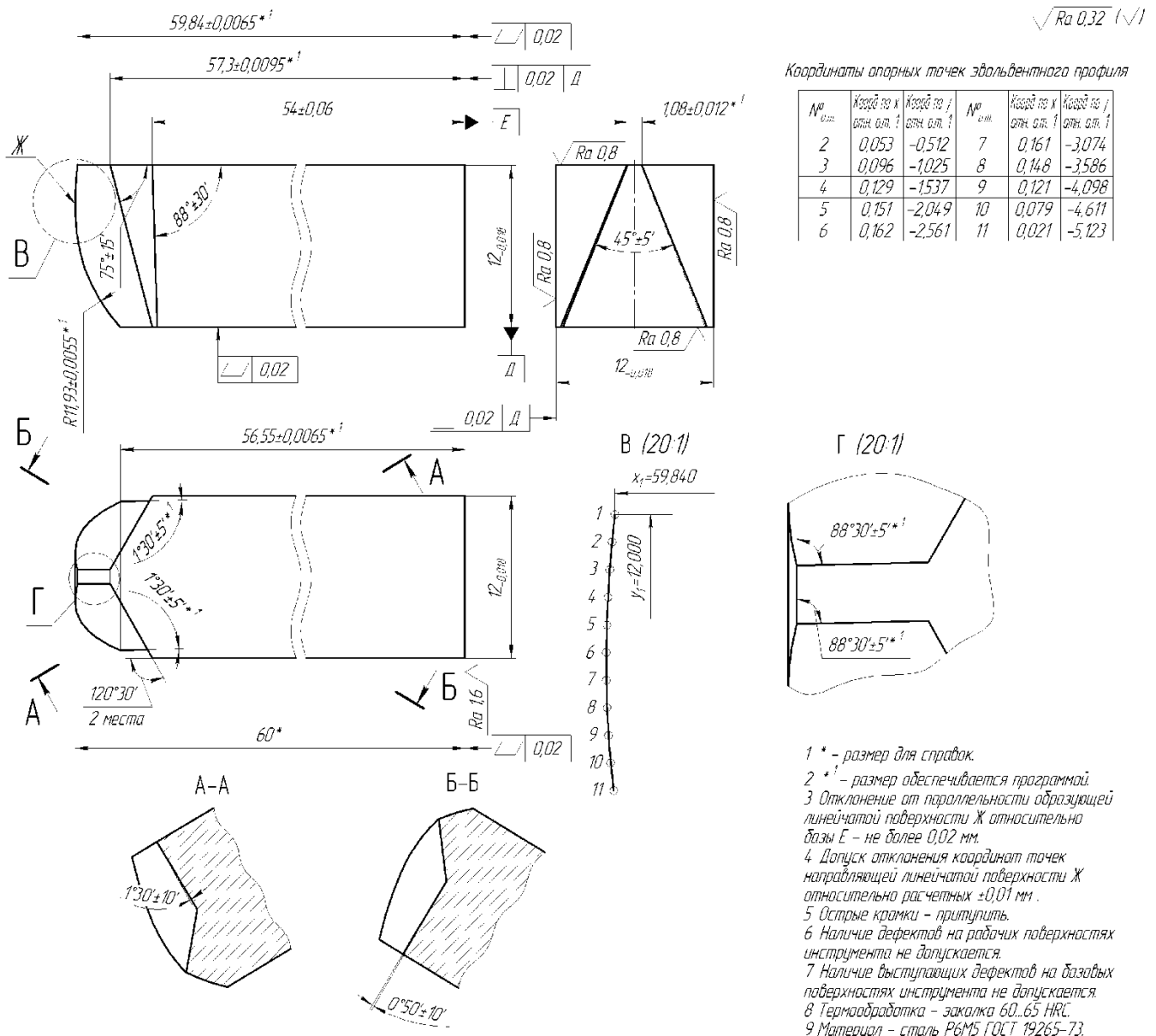


Рис. 6. Эскиз инструмента

Таким образом, в результате применения процедуры проектирования и рекомендаций по изготовлению, описанных в настоящей статье, получен специальный инструмент – резец (см. рис. 5), позволяющий произвести физическое моделирование процесса комбинированной чистовой зубообработки ЦЗК шевингованием-прикатыванием с высокой степенью подобия. При этом, форма и характер расположения зоны контактирования поверхностей обрабатываемой заготовки и инструмента не противоречат основным аспектам теории зубчатого зацепления, рассмотренным, в частности, в работах [9 – 12].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Борискин О.И., Валиков Е.Н., Белякова В.А. Комбинированная обработка зубьев цилиндрических зубчатых колес шевингованием – прикатыванием: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 123 с.
2. Валиков Е.Н., Белякова В.А. Режущо-деформирующая чистовая обработка боковых поверхностей зубьев зубчатых колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 216 с.
3. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С. Инновационные технологии обработки зубьев цилиндрических колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 335 с.
4. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В. Концептуальные основы физического моделирования процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // СТИН. 2022. № 2. С. 2–7.

5. **Гордон В.О., Семенцов-Огиевский М.А.** Курс начертательной геометрии: Учеб. пособие для вузов / под ред. В.О. Гордона и Ю.Б. Иванова. – 24-е изд., стер. М.: Высшая шк., 1998. 272 с.

6. **Металлорежущие инструменты:** учебник для вузов по специальности «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты» / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.

7. **Alam M.N., Siddiquee A.N., Khan Z.A.** A comprehensive review on wire EDM performance evaluation // Journal of process mechanical engineering. 2022. V. 236 (4). P. 1724–1746.

8. **Joshi A.** Wire cut EDM process limitations for tool and die steel // International journal of technical research and application. 2014. №2. P. 65–68.

9. **Litvin F.L., Chen N.X., Hsiao C.L., Handschuh R.F.** Generation of Helical gears with new surfaces topology by application of CNC machines // Gear technology. 1994. January/February. P. 30–33.

10. **Litvin F.L., De Donno M., Lian Q., Lagutin S.A.** Alternative Approach for Determination of Singularities and Envelopes to a Family of Parametric Surfaces // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 1998. No 167. P. 153–165.

11. **Litvin F.L., Fuentes A.** Gear geometry and Applied theory. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2004, 800 pp.

12. **Radzevich S.P.** Gear Cutting Tools: Science and Engineering, 2nd Edition, Boca Raton, Florida, 2017, 564 pp.

## REFERENCES

1. Boriskin O.I., Valikov E.N., Belyakova V.A. Combined technique for shaving-rolling cylindrical cog-wheel teeth: monograph. Tula: Izdatelstvo TulGU, 2007, 123 p. (in Russian).

2. Valikov E.N., Belyakova V.A. Cog-wheel side surface cutting-deforming finishing: monograph. Tula: Izdatelstvo TulSU, 2011. 216 p. (in Russian).

3. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Yamnikov A.S. Innovative technologies of processing of teeth of cylindrical wheels: monograph. Tula: IzdatelstvoTulSU, 2011, 335 p.

4. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Kovalev Yu.V. Conceptual foundations of physical modeling for shaving-rolling cylindrical gears // STIN, 2022, no. 2, pp. 2–7.

5. Gordon V.O., Sementsov-Ogievsky M.A. Course of descriptive geometry: Textbook for universities / edited by V.O. Gordon and Yu.B. Ivanov. – 24-th ed., ster. Moscow: Higher School, 1998, 272 p.

6. Metal-cutting tools: textbook for higher education institutions on specialties «Technology of Mechanical Engineering», «Metal-cutting machines and tools» / G.N. Sakharov, O.B. Arbuzov, Yu.L. Borovoy, et. al. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 328 p. (in Russian).

7. Alam M.N., Siddiquee A.N., Khan Z.A. A comprehensive review on wire EDM performance evaluation // Journal of process mechanical engineering. 2022. V. 236 (4). P. 1724–1746.

8. Joshi A. Wire cut EDM process limitations for tool and die steel // International journal of technical research and application. 2014. №2. P. 65–68.

9. Litvin F.L., Chen N.X., Hsiao C.L., Handschuh R.F. Generation of Helical gears with new surfaces topology by application of CNC machines // Gear technology. 1994. January/February. P. 30–33.

10. Litvin F.L., De Donno M., Lian Q., Lagutin S.A. Alternative Approach for Determination of Singularities and Envelopes to a Family of Parametric Surfaces // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 1998. No 167. P. 153–165.

11. Litvin F.L., Fuentes A. Gear geometry and Applied theory. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2004, 800 pp.

12. Radzevich S.P. Gear Cutting Tools: Science and Engineering, 2nd Edition, Boca Raton, Florida, 2017, 564 pp.

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

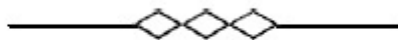
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

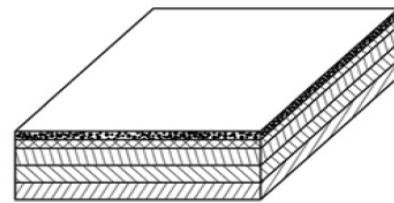
**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.12.2022; одобрена после рецензирования 20.03.2023; принята к публикации 29.03.2023

The article was submitted 29.12.2022; approved after reviewing 20.03.2023; assepted for publication 29.03.2023





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 15-21.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 15-21.

Научная статья  
УДК 620.16;620.18  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-15-21

## Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана и последующей термической обработки на структуру и свойства сплава АМг6

Юлия Владимировна Шерина<sup>1</sup>, аспирант,  
Альфия Расимовна Луц<sup>2</sup>, к.т.н.,  
Петр Евгеньевич Кичаев<sup>3</sup>, к.т.н.,  
Максим Валерьевич Богатов<sup>4</sup>, аспирант,  
Александр Петрович Амосов<sup>5</sup>, д.т.н.

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

<sup>1</sup> yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5451-7107>

<sup>2</sup> alya\_luts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7889-9931>

<sup>3</sup> mech\_kaf@samgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7321-389X>

<sup>4</sup> bogatov@npcsamara.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6232-5666>

<sup>5</sup> egundor@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1994-5672>

**Аннотация.** В работе проведен анализ механических свойств и коррозионной стойкости промышленного сплава АМг6 и композиционного материала АМг6-10%TiC, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Показано, что наличие карбидной фазы и последующий нагрев до 230 °С позволяет повысить твердость на 17 % и сохранить высокую коррозионную стойкость композита.

**Ключевые слова:** карбид титана, композиционный материал, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, термическая обработка

**Для цитирования:** Шерина Ю.В., Луц А.Р., Кичаев П.Е., Богатов М.В., Амосов А.П. Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана и последующей термической обработки на структуру и свойства сплава АМг6 // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 15–21. doi: 10.30987/2223-4608-2023-15-21

## The effect of reinforcement with a titanium carbide high-dispersity phase and subsequent heat treatment on the structure and properties of the АМg6 alloy

Yulia V. Sherina<sup>1</sup>, PG student,  
Alfiya R. Luts<sup>2</sup>, PhD Eng.,  
Peter E. Kichaev<sup>3</sup>, PhD Eng.,  
Maxim V. Bogatov<sup>4</sup>, PG student,  
Alexander P. Amosov<sup>5</sup>, D. Eng.

<sup>1,2,3,4,5</sup> Samara State Technical University, Samara, Russia

<sup>1</sup> yulya.makhonina.97@inbox.ru,

<sup>2</sup> alya\_luts@mail.ru

<sup>3</sup> mech\_kaf@samgtu.ru

<sup>4</sup> bogatov@npcsamara.ru

<sup>5</sup> egundor@yandex.ru

**Abstract.** *The analysis of mechanical properties and corrosion resistance of industrial alloy AMg6 and composite material AMg6-10%TiC obtained by self-propagating high-temperature synthesis is carried out. It is shown that the existence of a carbide phase and subsequent heating up to 230 °C allows increasing the hardness by 17 % and maintaining a high corrosion resistance of the composite.*

**Keywords:** titanium carbide, composite material, self-propagating high-temperature syn-thesis, heat treatment

**For citation:** Sherina Yu.V., Lutz A.R., Kichaev P.E., Bogatov M.V., Amosov A.P. The effect of reinforcement with a titanium carbide high-dispersity phase and subsequent heat treatment on the structure and properties of the AMg6 alloy / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 15–21. doi: 10.30987/2223-4608-2023-15-21

Одним из наиболее перспективных способов повышения характеристик традиционных алюминиевых сплавов является введение в их состав дополнительных высокопрочных частиц второй фазы, в качестве которых чаще всего используют керамические соединения – оксиды, карбиды, нитриды, бориды и т. д. Полученные таким образом композиционные материалы отличаются уникальным сочетанием механических, технологических и эксплуатационных свойств.

Наиболее подходящей для армирования алюминиевой матрицы является фаза карбида титана, имеющая близкие к алюминию параметры кристаллической решетки и обладающая высокой твердостью, модулем упругости, низкой плотностью и хорошей смачиваемостью [1]. Но конечные свойства подобных композитов в значительной мере определяются способом их получения. Так, введение готовой карбидной фазы в расплав извне исключает возможность формирования высокодисперсной фазы, поскольку частицы склонны к агломерированию, а также может способствовать внесению нежелательных примесей. Поэтому наиболее перспективным вариантом является формирование карбида титана непосредственно в расплаве, из исходных элементных порошков титана и углерода или их соединений.

Данная технология, основанная на методе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), отработана на кафедре «Материаловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» Самарского государственного технического университета. По результатам проведенных исследований ранее была показана возможность успешного синтеза композиционных материалов составов Al-10%TiC, Al-5%Cu-10%TiC, Al-5%Cu-2%Mn-10%TiC и др., содержащих высокодисперсную фазу карбида титана с размером частиц от 100 нм и

отличающихся повышенными характеристиками прочности [2].

Анализ исследований по данной тематике также показал, что повышения механических свойств композиционных материалов можно достигнуть не только за счет армирования, но и в результате термической обработки сплава-основы с реализацией традиционных механизмов упрочнения. Однако необходимо отметить несколько важных аспектов.

Во-первых, как правило, композиционные материалы имеют иную, по сравнению с матрицей, кинетику старения. Так, в работе [3] показано влияние термической обработки, состоящей из выдержки при температуре 538 °C в течение восьми часов с последующей закалкой в кипящую воду и старения при температуре 155 °C матричного сплава A359 (система Al-Si-Mg) и композиционных материалов на его основе A359-(5...15)%SiC и A359-(5...15)%(SiC + Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>).

Выявлено, что значение твердости у композитов выше, чем у базового сплава как после закалки, так и при максимуме на кривой старения. Это связано с наличием в их структуре более твердых, чем алюминиевый твердый раствор, частиц, а также упрочнением матрицы дислокациями, сгенерированными вблизи частиц в процессе кристаллизации. При этом максимальное значение твердости достигается значительно быстрее в композитах по сравнению с базовым сплавом.

Во-вторых, присутствие армирующих частиц второй фазы позволяет получить эффект от термической обработки матричных сплавов, которые в традиционной металлургии таким образом не упрочняются. Так, в работе [4] показано, что после проведения закалки с 550 °C и последующего старения композиционного материала AMg1,0 + 2,5 % масс. SiC при 160 °C в течение 30 мин достигнуто существенное повышение твердости за счет изменения



состава и структуры межфазных границ и улучшения качества связи матрица-наполнитель.

Проведенный анализ исследований в области термической обработки композиционных материалов, полученных на основе промышленных алюминиевых сплавов, показал, что данное направление перспективно для исследований и первые результаты уже позволяют делать выводы об эффективности термической обработки композиционных материалов, синтезированных на основе промышленных сплавов. Подобное повышение прочностных характеристик наиболее актуально для сплавов системы Al-Mg, отличающихся хорошей деформируемостью, свариваемостью, коррозионной стойкостью, но невысокими механическими свойствами. Поэтому целью данного исследования было поставлено получение методом СВС композиционного материала АМг6-10%TiC, проведение термической обработки и сравнение его характеристик со свойствами матричного сплава АМг6.

Синтез композиционного материала АМг6-10%TiC проводился путем ввода взятых в стехиометрическом соотношении порошков титана марки ТПП-7 (ТУ 1715-449-05785388-99) и углерода марки П-701 (ГОСТ 7885-86) в разогретый в графитовом тигле плавильной печи ПП 20/12 до температуры 900 °С расплав АМг6 (ГОСТ 4784-97) [2]. Микроструктурный анализ проводился на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390A, микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) – на этом же микроскопе с использованием приставки Jeol JED-2200.

Фазовый состав синтезированных образцов изучался на автоматизированном дифрактометре марки ARL X'tra (Thermo Scientific) с использованием Си-излучения при непрерывном сканировании в интервале углов  $2,0 \theta$  от 20° до 80° со скоростью 2,0 °/мин путем обработки полученных в результате рентгенофазового анализа (РФА) дифрактограмм. Для термической обработки синтезированных образцов применялись лабораторные камерные печи СНОЛ. Твердость образцов исследовалась на твердомере ЗИП ТК-2М по методу Бринелля по ГОСТ 9012-59. Микротвердость образцов исследовалась на стандартном микротвердомере Виккерса ПТМ-3 по ГОСТ 9450-76 методом

вдавливании алмазной пирамидки с квадратным основанием и межгранным углом при вершине 136°, навеска на индентор составляла 100 г. Испытания на растяжение проводились на разрывной машине Inspekt 200 по ГОСТ 1497-84, испытания на сжатие – на образцах III типа с диаметром  $d_0 = 20$  мм по ГОСТ 25.503-97. Стойкость к коррозии исследовалась по ГОСТ 13819-68 в автоклавном комплексе Coat Test 3.3.150.150 в следующих условиях: водный раствор 5%NaCl, газовая фаза 1,0 МПа CO<sub>2</sub>; 0,5 МПа H<sub>2</sub>S; 3,5 МПа N<sub>2</sub> при температуре 80 °С, длительность 240 ч, общее давление 5,0 МПа. Параметры коррозионной стойкости рассчитывались по ГОСТ 9.908-85.

Процесс СВС композиционного материала АМг6-10%TiC сопровождался активным искро- и газообразованием. Изломы полученных образцов однородно-серые, без посторонних включений и остатков непрореагировавшей шихты, с незначительной пористостью. Результаты микроструктурного, микрорентгеноспектрального и рентгенофазового исследований приведены на рис. 1 – 3 и в табл. 1.

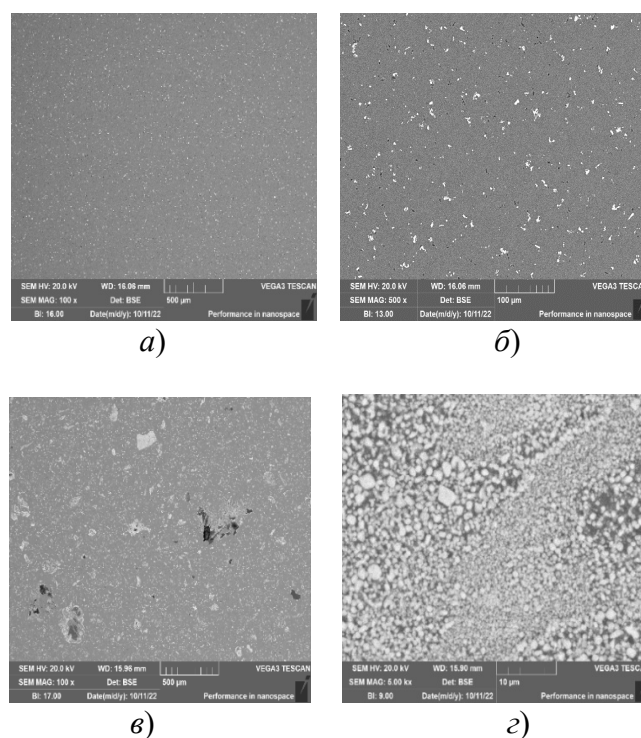


Рис. 1. Микроструктура:

а, б – сплав АМг6; в, г – композиционный материал АМг6-10%TiC

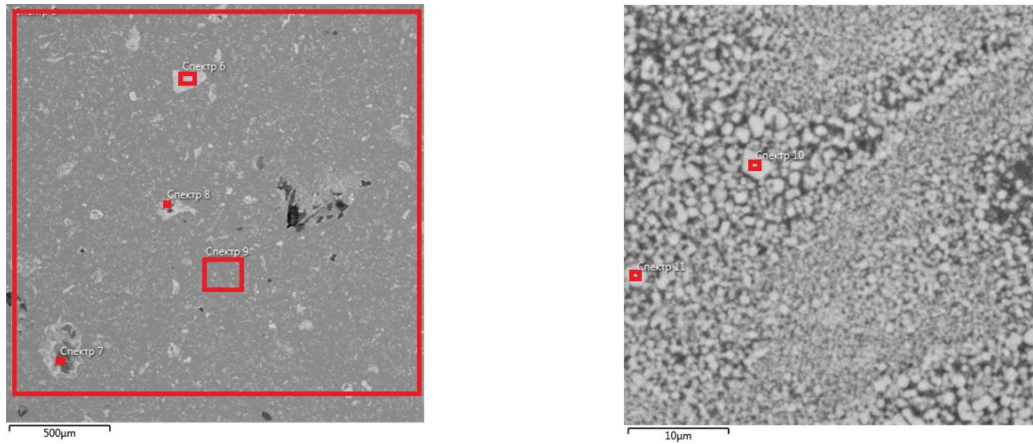


Рис. 2. Микрорентгеноспектральный анализ композиционного материала АМг6-10%ТiС

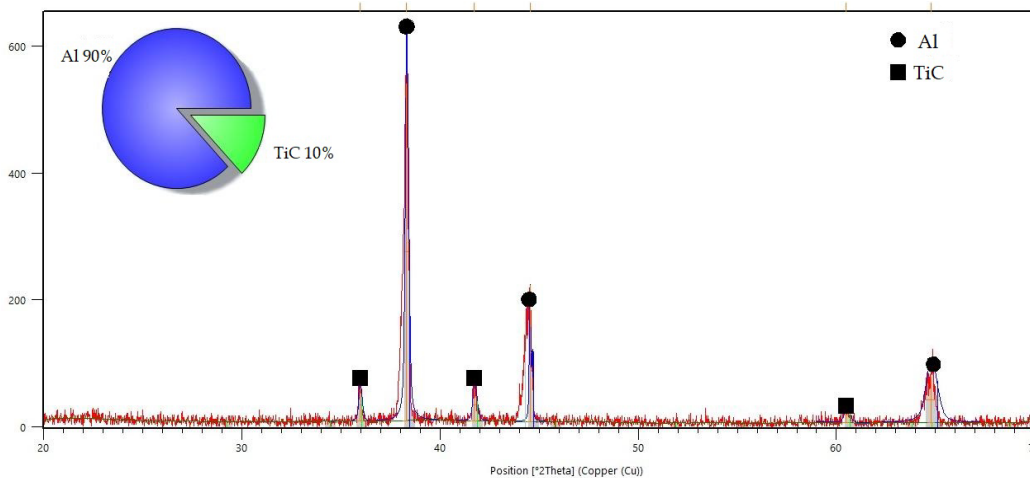


Рис. 3. Рентгенофазовый анализ композиционного материала АМг6-10%ТiС

1. Микрорентгеноспектральный анализ композиционного материала АМг6-10%ТiС

Номер маркера	Количество элементов, % вес.						
	C	Mg	Al	Ti	Mn	Si	Fe
Спектр 5	9,49	4,34	76,72	8,44	0,67	0,13	0,21
Спектр 6	18,6	1,48	27,42	52,5	-	-	-
Спектр 7	30,08	2,93	65,78	1,21	-	-	-
Спектр 8	17,75	1,84	27,78	52,64	-	-	-
Спектр 9	8,1	4,7	81,19	5,48	0,53	-	-
Спектр 10	18,12	-	4,45	77,43	-	-	-
Спектр 11	19,3	-	9,32	71,37	-	-	-

Их анализ позволяет сделать вывод, что синтез фазы карбида титана удалось провести в полной мере, образованные частицы имеют субмикронные размеры и относительно равномерно распределены по объему сплава. Наличие, по данным МРСА, магния может свидетельствовать о частичном выделении упрочняющей  $\beta$ -фазы ( $Mg_2Al_3$ ) из  $\alpha$ -твердого раствора алюминия. Присутствие в небольшом

количестве Mn, Si, Fe, очевидно, является результатом выделения фаз кристаллизационного происхождения типа  $Mg_2Si$ ,  $Al_6(Fe, Mn)$ ,  $Al_{15}(Fe, Mn)_2Si_3$  в процессе охлаждения композита после СВС [5].

Для выбора режима термической обработки были проанализированы состав и структура промышленного сплава АМг6. Известно, что при содержании магния в количестве более 1,4 % при

повышении температуры фаза  $Mg_2Al_3$  растворяется и магний образует с алюминием  $\alpha$ -твердый раствор. Соответственно, при охлаждении происходит обратный процесс и чем больше этой фазы выделится, тем больше будет упрочняющий эффект. Однако ввиду относительно малого содержания магния упрочнение сплава АМг6 обычно невелико. Поэтому гораздо чаще его пластически деформируют и используют в нагартованном или полунагартованном состояниях, после чего, в случае необходимости, подвергают последующему отжигу с целью повышения пластичности.

В настоящем исследовании было предположено, что наличие большого количества дисперсных включений армирующей фазы приводит к искажению кристаллической решетки матрицы и тем самым должно способствовать интенсификации диффузионных процессов и, соответственно, упрочнению.

В работах отечественных авторов приводятся различные температурные режимы, приводящие к выделению фазы  $Mg_2Al_3$  [6 – 8], поэтому в качестве исследуемых температурно-временных параметров были выбраны температуры нагрева выше и ниже линии ограниченной растворимости: 230 °С длительностью 1,0...6,0 ч и 320 °С длительностью 1,0...3,0 ч с охлаждением на спокойном воздухе, а также режим закалки с температуры 450 °С с последующим естественным старением.

В качестве первичного количественного критерия оценки результатов использовалось значение твердости. У исходного сплава АМг6Н твердость составляла 830 МПа, у композиционного

материала АМг6-10%TiC – 909 МПа. После проведения различных режимов термической обработки были получены следующие результаты: нагрев до 230 °С в течение 3,0 ч и более приводит к повышению твердости до 999 НВ; нагрев до 320 °С не влияет на изменение твердости; закалка с 450 °С приводит к повышению твердости на 10 суток естественного старения, однако далее наблюдается снижение твердости до исходного значения.

Полученные результаты, объясняются тем, что при нагреве до температуры 230 °С первично выделенные фазы не успевают перейти в твердый раствор и при обратном охлаждении в присутствии дисперсных частиц происходит дополнительное выделение  $\beta$ -фазы.

Нагрев до 320 °С приводит к образованию твердого раствора, и затем в процессе охлаждения не успевает произойти его распад в полной мере. Ускоренное охлаждение после нагрева до 450 °С, очевидно, фиксирует твердый раствор и только в процессе старения начинается выделение небольшого количества упрочняющей фазы, эффект от которого, вероятно, нивелируется в результате роста зерна и образования на границах зерен оксидов магния в результате высокотемпературного нагрева [9].

С целью дальнейшей оценки и сравнения механических характеристик были исследованы прочность на растяжение, относительное удлинение и сужение, прочность на одноосное сжатие, относительное укорочение, твердость и микротвердость образцов до и после термической обработки по оптимальному режиму (табл. 2).

**2. Механические свойства композиционного материала АМг6-10%TiC**

Состав образца	Испытание на растяжение			Испытание на одноосное сжатие		НВ, МПа	HV, МПа
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$\sigma_b^c$ , МПа	$\epsilon$ , %		
АМг6Н	367	21	45	449	32	830	991
АМг6-10%TiC, без термической обработки	180	-	21	403	19	909	1020
АМг6-10%TiC, нагрев 230 °С 3,0 ч	231	7	9	395	14	999	1069

Установлено, что наличие твердых частиц карбидной фазы приводит к некоторому снижению его прочностных характеристик, особенно при растяжении, что, очевидно, связано с преимущественным зарождением трещин на поверхностях раздела или в участках скопления армирующей фазы. Вместе с тем, присутствие высокодисперсных частиц в составе композиционного материала позволяет повысить его твердость в литом состоянии на 9 %, а после дополнительного нагрева – на 17 %.

Одним из главных достоинств сплава АМг6 является его коррозионная стойкость, он

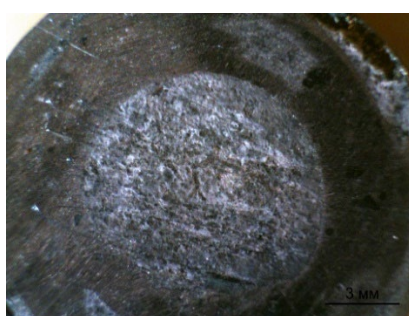
относится к группе весьма стойких и характеризуется 3 баллами [10]. Поэтому в данной работе было изучено влияние армирования и термической обработки на коррозионную стойкость композиционного материала. Результаты оценки коррозионной стойкости представлены в табл. 3 и на рис. 4. Установлено, что образцы композиционного материала как до, так и после нагрева имеют высокую устойчивость к углекислотной и сероводородной коррозии, что позволяет отнести их, как и матричный сплав, к классу весьма стойких материалов.

### 3. Коррозионная стойкость композиционного материала АМг6-10%TiC

Состав образца	Показатель				
	Потеря массы образца, г	Потеря массы на единицу площади $\Delta m$ , кг/м <sup>2</sup>	Изменение толщины образца $\Delta L$ , м	Скорость коррозии $v$ , г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Глубинный показатель коррозии $\pi$ , мм/год
АМг6Н	0,8935	0,231	0,082	0,962	0,003
АМг6-10%TiC, без термической обработки	0,5826	0,151	0,057	0,627	0,0021
АМг6-10%TiC, нагрев 230 °С 3,0 ч	0,8063	0,208	0,075	0,868	0,0027



а)



б)



в)

**Рис. 4. Внешний вид образцов после выдержки в коррозионной среде:**  
 а – сплав АМг6; б – композиционный материал АМг6-10%TiC в литом состоянии;  
 в – композиционный материал АМг6-10%TiC после нагрева до 230 °С

### Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Экспериментально показана возможность проведения СВС высокодисперсной фазы карбида титана в составе промышленного сплава АМг6.

Присутствие фазы карбида титана способствует повышению твердости на 9 % уже после СВС композиционного материала АМг6-10%TiC, а после дополнительного нагрева до 230 °С и выдержки в течение 3,0 ч – до 17 %. Наличие карбидной фазы обуславливает некоторое снижение характеристик прочности, при сохранении высокой коррозионной стойкости.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Михеев Р.С.** Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники / Р.С. Михеев, Т.А. Чернышова // М.: Издание РФФИ, 2013. ISBN: 978-5-91146-913-9.
2. **Луц А.Р., Шипилов С.И., Рыбаков А.Д.** Влияние легирующей добавки никеля на структуру композиционного материала Al-10%TiC. // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 10 (112). С. 10–15.
3. **Алаттар А.Л.** Повышение механических свойств композиционных алюминиевых сплавов при вводе карбида бора / А.Л. Алаттар, В.Ю. Бажин, А.А. Власов // ВИГТУ. – 2020. № 24 (3). С. 663–671. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-3-663-671
4. **Курганова Ю.А.** Исследование механических свойств перспективных алюмоматричных композиционных материалов, армированных SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Ю.А. Курганова, А.Г. Колмаков, Ицзинь Чэнь, С.В. Курганов // Материаловедение. 2021. №6. С. 34–38. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-6-34-38
5. **Белов Н.А.** Фазовый состав алюминиевых сплавов. М.: МИСИС, 2009. ISBN: 978-5-87623-213-7.
6. **Кишик М.С.** Эволюция микроструктуры сплава системы Al-Mg в процессе всесторонней изотермической осадки / М.С. Кишик, В.К. Портной, А.В. Михайловская // Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы: сборник тезисов докладов открытой школы-конференции стран СНГ. Уфа: РИЦ БашГУ. 2016. С. 71. ISBN 978-5-7477-4161-4
7. **Колачев Б. А.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов // М.: МИСИС. 1999. 416 с.
8. **Зенин М.Н.** Влияние высокотемпературного отжига алюминиевых сплавов AMg6 и V95 на их структурно-фазовое состояние и прочностные свойства / М.Н. Зенин, А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, М.А. Гурьев, Е.В. Черных // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19. № 1. С. 106–114.
9. **Рафальский И.В.** Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения. Минск: БНТУ, 2016. ISBN 978-985-550-950-0.
10. **Перельгин Ю.П.** Коррозия и защита металлов от коррозии / Ю.П. Перельгин, И.С. Лось, С.Ю. Киреев // Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. ISBN 978-5-906831-37-8.

## REFERENCES

1. Mikheev R.S. Alumomatrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology / R.S. Mikheev, T.A. Chernyshova // Moscow: Russian Foundation for Basic Research, 2013, 356 p. ISBN: 978-5-91146-913-9.
2. Luc A. R., Shipilov S. I., Rybakov A. D. Nickel alloy addition impact upon structure of Al-10%TiC composite / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2020, no. 10 (112), pp. 10–15. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-10-10-15>.
3. Alattar A.L. Increasing the mechanical properties of composite aluminum alloys when introducing borocarbon / A. L. Alattar, V.Y. Bazhin, A.A. Vlasov // VIGTU, 2020, No.24(3), pp.663-671. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-3-663-671
4. Kurganova Yu.A. Study of mechanical characteristics of advanced Aluminum-matrix composites reinforced with SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Yu.A. Kurganova, A.G. Kolmakov, Yijin Chen, S.V. Kurganov // Materialovedenie, 2021, no. 6. pp. 34–38. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-6-34-38
5. Belov N.A. Phase composition of aluminum alloys. Moscow: MISIS, 2009. ISBN: 978-5-87623-213-7.
6. Kishik M.S. Evolution of the micro-structure of the Al-Mg alloy system in the process of comprehensive iso-thermal precipitation / M.S. Kishik, V.K. Portnoy, A.V. Mikhailovskaya // Ultra-fine-grained and nanostructured materials: collection of abstracts of papers of the open school-conference of the CIS countries. Ufa: RIC BASHGU, 2016, p. 71. ISBN 978-5-7477-4161-4
7. Kolachev B. A. Science of metals and heat treatment of non-ferrous metals and alloys: textbook / B.A. Kolachev, V.I. Elagin, V.A. Livanov // Moscow: MISIS, 1999, 416 p. (in Russian).
8. Zenin M.N. Influence of high-temperature annealing of aluminum alloys AMg6 and V95 on their structural-phase state and strength properties / M.N. Zenin, A.M. Guryev, S.G. Ivanov, M.A. Guryev, E.V. Chernykh // Fundamental problems of modern materials science, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 106–114.
9. Rafalsky I.V. Resource-saving synthesis of aluminum-based alloys using dispersed non-metallic materials and intellectual methods for controlling the metallurgical processes of their production. Minsk: BNTU, 2016. ISBN 978-985-550-950-0.
10. Perelygin Yu.P. Corrosion and rust protection of metals / Yu. P. Perelygin, I.S. Los, S.Yu. Kireev / Penza: Izdatelstvo PSU, 2015. ISBN 978-5-906831-37-8.

**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 14.03.2023; одобрена после рецензирования 23.03.2023; принята к публикации 31.03.2023

The article was submitted 14.03.2023; approved after reviewing 23.03.2023; accepted for publication 31.03.2023

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 22-32.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 22-32.

Научная статья  
УДК 621.793.71:621.315.612.7  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-22-32

## Влияние режимов плазменного напыления порошка оксида алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия

Михаил Евгеньевич Соловьев<sup>1</sup>, д.ф.м.н.,  
Алексей Борисович Раухваргер<sup>2</sup>, к.ф.м.н.,  
Сергей Львович Балдаев<sup>3</sup>, к.т.н.,  
Лев Христофорович Балдаев<sup>4</sup>, д.т.н.,  
Виктория Игоревна Мищенко<sup>5</sup>

<sup>1, 2</sup> Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия,  
<sup>3, 4, 5</sup> ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва, г. Щербинка

<sup>1</sup> me\_s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8840-248X>

<sup>2</sup> ABRRS@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>3</sup> s.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-7979>

<sup>4</sup> l.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9084-8771>

<sup>5</sup> v.mishchenko@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8494-0707>

**Аннотация.** Приведены результаты исследования влияния параметров плазменного напыления порошка оксида алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия. Предложена математическая модель зависимости свойств покрытия от режимов напыления, таких как расстояние плазмотрона до поверхности подложки, силы тока и расхода водорода. Показано наличие положительной корреляции между пористостью и электрическим сопротивлением покрытия.

**Ключевые слова:** плазменные покрытия, режимы напыления, пористость, электрическое сопротивление

**Для цитирования:** Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И. Влияние условий плазменного напыления порошка оксида алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 22–32. doi: 10.30987/2223-4608-2023-22-32

## Influence of conditions of plasma spraying of aluminum oxide powder on the porosity and electrical resistance of a coating

Mikhail E. Soloviev<sup>1</sup>, D. Phys. Math.,  
Alexey B. Rauhvarger<sup>2</sup>, Cand.Sci. Phys. Math.,  
Sergey L. Baldaev<sup>3</sup>, Ph.D. Eng.,  
Lev K. Baldaev<sup>4</sup>, D. Eng.,  
Victoria I. Mishchenko<sup>5</sup>

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

<sup>3, 4, 5</sup> LLC «Technological systems of protective coatings», Moscow, Shcherbinka

<sup>1</sup> me\_s@mail.ru,

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

<sup>3</sup> s.baldaev@tspc.ru

<sup>4</sup> l.baldaev@tspc.ru

<sup>5</sup> v.mishchenko@tspc.ru

**Abstract.** Research evidence of plasma parameters effect when spraying aluminum oxide powder, causing the porosity and electrical resistance of the coating is offered in the article. A mathematical model of the coating effect dependence on spray coating modes, e.g. plasmotron distance to underlay surface, current strength and hydrogen consumption is proposed. Positive correlation between the porosity and the electrical resistance of the coating is shown.

**Keywords:** plasma coatings, spray coating modes, porosity, electrical resistance

**For citation:** Soloviev M.E., Raukhvager A.B., Baldaev S.L., Baldaev L.K., Mischenko V.I. Influence of conditions of plasma spraying of aluminum oxide powder on the porosity and electrical resistance of a coating / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 22–32. doi: 10.30987/2223-4608-2023-22-32

## Введение

К числу специальных покрытий, наносимых методом плазменного или газотермического напыления на поверхность металлов, относятся керамические покрытия, обеспечивающие диэлектрические свойства поверхности металлических деталей [1 – 4]. При плазменном напылении источником высокой температуры, обеспечивающей нагрев и плавление наносимых на поверхность детали порошкообразных частиц, является плазма газового разряда, формируемая в головке распылителя.

В качестве рабочего газа в современных плазматронах чаще всего используются инертные газы, такие как аргон, гелий и т. п., кроме того, в состав газовой смеси может добавляться водород, который обеспечивает повышение температуры газовой струи и улучшения качества покрытия [5]. Порошок подается в струю рабочего газа аксиально или радиально по отношению к направлению газовой струи. Процесс нанесения покрытия заключается в нагреве, диспергировании и переносе частиц распыляемого материала газовым потоком и формировании на подложке компактного слоя.

На качество образующегося покрытия влияет достаточно большое число технологических параметров процесса [2 – 4, 6, 7], среди которых: мощность плазменной струи, состав газа, расход газового потока, геометрия анодного сопла и расстояние от него до обрабатываемой поверхности, расход порошка и способ его подачи.

Среди различных видов керамических покрытий, обеспечивающих диэлектрические свойства поверхности изделия, наиболее распространенным и доступным является оксид алюминия. Промышленностью выпускается как  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , так и  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При плазменном напылении в зависимости от метода и режима процесса фазовый состав оксида в покрытии изменяется. Формирование фаз и плотность покрытия зависят от температуры. С повышением температуры напыляемой поверхности

возрастает доля фазы  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и увеличивается плотность напыленного оксида [4].

В работе [8] исследована микроструктура и механические свойства покрытий оксида алюминия на нержавеющей стали для трех вариантов режимов нанесения, различающихся значениями одного параметра CPSP (critical plasma spraying parameter): отношения мощности плазменной струи к расходу плазмообразующего газа (аргона). Установлено, что при среднем значении параметра из трех изученных обеспечиваются наилучшие стойкость к износу покрытия при умеренной твердости и хорошей стойкости к термоциклированию.

Авторами [9] изучены следующие свойства плазменных покрытий на основе оксида алюминия с небольшой добавкой оксида титана на стальной подложке: прочность адгезионной связи с подложкой  $A$ , твердость покрытия  $H$  и коэффициент трения  $\mu$ . В качестве варьируемых параметров технологического процесса были выбраны ток плазматрона  $C$  (550 А; 650 А), скорость подачи порошка  $v$  (22.5 г/мин; 26 г/мин) и расстояние от сопла до поверхности напыления  $d$  (75 мм; 90 мм). Всего было сделано восемь экспериментов по ортогональной линейной схеме. По результатам экспериментов были сделаны следующие выводы: увеличение  $v$  и  $C$  приводит к увеличению  $A$ ,  $H$  и снижению  $\mu$ , тогда как с увеличением  $d$  наблюдается снижение  $A$  и  $\mu$  и рост  $H$ . Следует отметить, что отсутствие в работе результатов статистической обработки экспериментов не позволяет судить о достоверности данных выводов.

Автор [10] исследовал влияние расстояния до подложки, толщины покрытия, температуры подложки и ее шероховатости на твердость, пористость и шероховатость поверхности плазменного покрытия оксида алюминия на нержавеющей стали. Установлено, что при заданных постоянных значениях расхода аргона и водорода, тока плазматрона, равном 500 А, и скорости подачи порошка 40 г/мин зависимости твердости, пористости и шероховатости покрытия от расстояния до подложки имеют экстремальный характер. Оптимальное

значение расстояния до подложки  $d$ , при котором наблюдается максимум твердости и минимум пористости и шероховатости, составило около 12 см.

Данные по влиянию параметров напыления на электрические свойства покрытий оксидом алюминия весьма ограничены. Так в работе [11] представлены результаты исследования влияния температуры подложки и мощности плазменной струи на диэлектрические свойства покрытий оксида алюминия на нержавеющей стали. Показано, что с ростом температуры подложки электрическое сопротивление покрытия снижается, тогда как влияние мощности плазменной струи имеет экстремальный характер, проходя через минимум при значении мощности около 30 кВт.

Пористость плазменных покрытий является чрезвычайно важной их характеристикой, определяющей многие другие их физико-химические свойства [12]. Существуют разнообразные методы определения пористости покрытий [13], однако не все они согласуются между собой. В работах [8, 10] отмечалась антибатная зависимость между пористостью и твердостью покрытий.

Резюмируя приведенные данные, можно отметить, что систематического исследования по влиянию одновременно нескольких важных технологических параметров на диэлектрические свойства плазменных покрытий оксидом алюминия не проводилось. В этой связи целью настоящей работы явилось исследование влияния тока плазмотрона  $C$ , расстояния от головки распылителя до обрабатываемой поверхности  $d$  и расхода водорода  $q$  на электрическое сопротивление и пористость плазменных покрытий оксида алюминия с использованием методов математического моделирования и статистического анализа результатов эксперимента.

### Объекты и методы исследования

В качестве металлического подслоя был использован материал на основе сплава никель-хрома, содержащий хром в количестве 20 % по массе. С целью определения основных характеристик были проведены лабораторные исследования пробы порошкового материала марки ПР-Х20Н80.

Насыпную плотность порошкового материала определяли в соответствии с ГОСТ 19440–94, она составила 4,53 г/см<sup>3</sup>. Текучесть порошкового материала определяли в соответствии с ГОСТ 20899–98, она составила 20 с.

Гранулометрический состав порошковых материалов определяли ситовым методом в соответствии с ГОСТ 18318–94, анализ показал, что 8,94 % массовой доли порошка < 20 мкм; 65,73 % – 20...45 мкм; 25,29 % – 45...63 мкм; 0,04 % ≥ 63 мкм.

В качестве керамического слоя был использован материал на основе оксида алюминия. С целью определения основных характеристик были проведены лабораторные исследования проба порошкового материала.

Насыпную плотность порошкового материала определяли в соответствии с ГОСТ 19440–94, она составила 0,95 г/см<sup>3</sup>. Текучесть порошкового материала определяли в соответствии с ГОСТ 20899-98, данный порошок не обладает текучестью.

Гранулометрический состав порошковых материалов определяли ситовым методом в соответствии с ГОСТ 18318-94, анализ показал, что 0,42 % массовой доли порошка < 20 мкм; 35,32 % – 20...45 мкм; 29,96 % 45...63 мкм; 34,30 % ≥ 63 мкм.

Плазменное напыление покрытий на образцы проводилось на автоматической установке плазменного напыления ООО «Технологические системы защитных покрытий» (рис. 1) с применением плазмотрона мощностью 35...55 кВт.

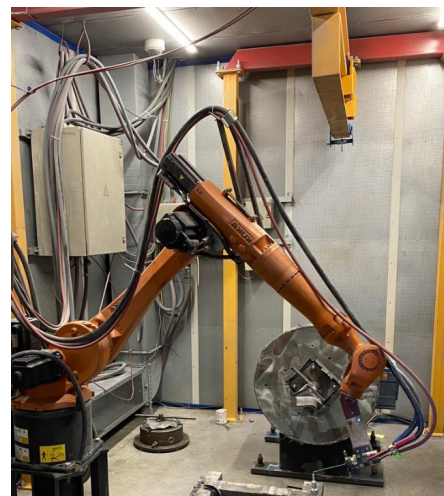


Рис. 1. Установка плазменного напыления



Микроструктуру покрытий изучали на поперечных шлифах. Шлифы подготовлены в несколько этапов. Резку образцов проводили на отрезном станке Struers Secotom-50. Образцы заливали смолой марки Struers VersoCit «холодным» способом.

Для подготовки поверхности к исследованию микроструктуры использовали водостойкую шлифовальную бумагу SiC № 500, № 1000, диск MD Dac, MD Nap. Для исследования микрошлифов использовали микроскоп оптический Микромед МЕТ с фотокамерой ADF PRO 03 с приложением TopView.

Для определения пористости покрытий использовали метод компьютерной обработки микрофотографий шлифов образцов. С этой целью было создано приложение для автоматического распознавания пор по фотографиям срезов слоев, созданных плазменным напылением, позволяющее минимизировать субъективный фактор в определении параметров, необходимых для прогнозирования физико-механических свойств покрытия.

При запуске пользователем процесса обработки выделенного фрагмента микрофотографии создаются два новых изображения (копии фрагмента), которые подвергаются следующим преобразованиям:

1. Оба изображения приводятся к оттенкам серого: вычисляется яркость каждого пикселя по стандарту, соответствующему современным мониторам:

$$z = 0,2126r + 0,7152g + 0,0722b, \quad (1)$$

где  $r, g, b$  – интенсивности компонент цвета в модели RGB. Затем полученное значение  $z$  округляется до целого  $z_{\text{окр}}$  и на место исходного пикселя вставляется новый, с компонентами  $r = z_{\text{окр}}$ ;  $g = z_{\text{окр}}$ ;  $b = z_{\text{окр}}$ .

Обработка первого изображения (рис. 2, а) на этом заканчивается, а второе подвергается дальнейшим преобразованиям.

2. Производится частичное ослабление градиента освещенности. Для этого определяются коэффициенты уравнения регрессии:

$$z_p = b + kx + k_2y + k_{12}xy, \quad (2)$$

из условия минимизация суммы  $\sum_{x=0}^w \sum_{y=0}^h (z - z_p)^2$ , где  $x, y$  – координаты пикселя;  $w, h$  – ширина и высота изображения (в пикселях). Далее яркость каждого пикселя изображения преобразуется вычитанием переменной части (2):

$$z_1 = z - kx - k_2y - k_{12}xy, \quad (3)$$

где  $z_1$  – новая яркость пикселя в положении с координатами  $x, y$ .

3. Производится увеличения яркости изображения. Для этого определяется средняя яркость:

$$z_{\text{cp}} = \frac{1}{wh} \sum_{x=0}^w \sum_{y=0}^h z_{xy}, \quad (4)$$

где  $z_{xy}$  – яркость пикселя в положении с координатами  $x, y$ . Затем вычисляется коэффициент увеличения

$$k = \frac{270}{z_{\text{cp}}} \quad (5)$$

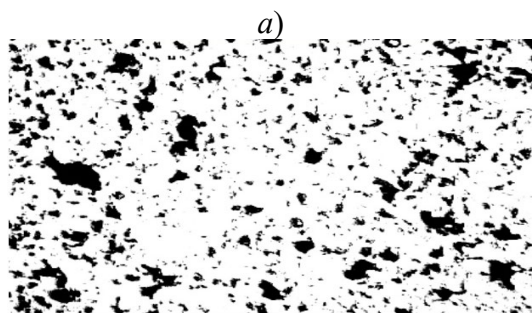
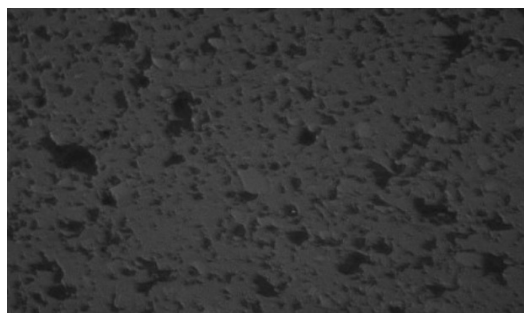
и предварительные значения новой яркости каждого пикселя  $z_{1xy} = kz_{xy}$ . Все значения округляются до целого, если значение превосходит 255, оно заменяется на 255. В соответствующих позициях создаются пиксели с новой яркостью.

4. Производится усиление контраста изображения по «телевизионному» алгоритму [14]. Для этого заново, в изображении, преобразованном по пункту 3, определяется средняя яркость по формуле (4), затем вычисляются предварительные значения новой яркости каждого пикселя по формуле телевизионного алгоритма с коэффициентом контраста равном 5,0:

$$z_{1xy} = z_{xy} + 5(z_{xy} - z_{\text{cp}}). \quad (6)$$

Все значения округляются до целого, если значение превосходит 255, оно заменяется на 255, отрицательные значения заменяются значением 0. В соответствующих позициях создаются пиксели с новой яркостью.

Для распознавания пор используется полученное после выполнения всех пунктов преобразования второе изображение (рис. 2, б).



б)

Рис. 2. Выделенный фрагмент первого изображения на микрофотографии шлифа (а) и преобразование второго изображения (б)

При запуске пользователем процесса распознавания пор, производится обход всех пикселей второго изображения, при котором пиксели с яркостью меньше 170 интерпретируются, как находящиеся в порах. При этом происходит определение пористости, как отношение количества пикселей «в порах» к общему количеству пикселей выделенного фрагмента.

Следует отметить, что данный метод определения пор не позволяет определить истинную пористость образца, как относительную долю объема пор по отношению к общему объему, а служит лишь ее некоторой оценкой. В то же время для многослойного покрытия определение истинной пористости отдельных слоев обычными методами не представляется возможным, тогда как данным методом можно получать такие оценки для каждого слоя и таким образом судить об их качестве.

Измерение сопротивления изоляции проводили с помощью Мегаомметра Е6-24 с испытательным напряжением от 50 до 2500 В. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности установки испытательного напряжения, %: от 0 до плюс 15. Значение сопротивления изоляции электрических

машин и аппаратов в большой степени зависит от температуры. В данной работе замеры производились при комнатной температуре.

### Результаты и обсуждение

Исследование влияния выбранных технологических параметров на электрическое сопротивление ( $y_1$ ) и пористость ( $y_2$ ) покрытий проводили методом математического планирования эксперимента [15]. В табл. 1 приведены значения постоянных и варьируемых параметров плазменного напыления порошков.

#### 1. Значения технологических параметров при плазменном напылении порошков

Параметры	Значения
Сила тока, А	525; 550; 575
Дистанция, мм	90; 105; 120
Расход водорода, л/мин	6; 7; 8
Расход аргона, л/мин	35
Диаметр и угол инжекторов	2×90°
Скорость перемещения горелки, м/с	0,5
Толщина итогового покрытия, мкм	255...265

Для удобства вычислений и анализа варьируемые независимые технологические параметры переводили из натуральных единиц в нормированные ( $x_i$ ) по формулам:

$$x_i = \frac{x_i^{\text{нат}} - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (7)$$

где  $x_i^{\text{нат}}$  – значения параметров в натуральных единицах (С, А; d, мм; q, л/мин, соответственно);  $x_{0i}$  – средний уровень для каждого фактора;  $\Delta x_i$  – шаг варьирования (табл. 2).

#### 2. Средние уровни и шаги варьирования независимых параметров

Параметры	$x_{0i}$	$\Delta x_i$
Сила тока, А	550	25
Дистанция, мм	105	15
Расход водорода, л/мин	7	1

Зависимости исследуемых свойств от независимых факторов аппроксимировали следующими уравнениями регрессии:

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_{1i}x_i + \sum_{i=2}^3 b_{1i}x_1x_i + b_{23}x_2x_3 + \sum_{i=1}^3 b_{22i}x_i^2 + b_{123}x_1x_2x_3, j = 1, 2, \quad (8)$$

где  $B = (b_0, b_{1i}, b_{22i}, b_{123})^T$ ,  $i = 1, 2, 3$  – вектор коэффициентов регрессии.

При проведении экспериментов значения независимых переменных изменяли по схеме ортогональной матрицы планирования, включавшей 25 экспериментов (табл. 3).

### 3. Значения независимых переменных и результаты опытов

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Электрическое сопротивление, $y_1$ МОм	Пористость, % $y_2$
1	1	1	1	6,96	19,3
2	-1	1	1	5,43	20,3
3	1	-1	1	3,65	18,9
4	-1	-1	1	3,85	20,2
5	1	1	-1	4,51	22,9
6	-1	1	-1	6,56	23,6
7	1	-1	-1	5,23	21,5
8	-1	-1	-1	3,06	18,4
9	0	1	1	6,02	19,6
10	0	-1	1	3,09	19,8
11	0	1	-1	0,49	21,2
12	0	-1	-1	0,95	22,1
13	1	0	1	3,54	19,5
14	-1	0	1	3,92	21,1
15	1	0	-1	3,82	19,3
16	-1	0	-1	4,38	21,3
17	1	1	0	7,17	25,0
18	-1	1	0	6,81	24,1
19	1	-1	0	8,68	22,4
20	-1	-1	0	6,72	25,6
21	0	0	0	6,64	24,5
22	0	0	0	5,84	26,6
23	0	0	0	5,07	28,9
24	0	0	0	5,69	25,7
25	0	0	0	7,57	27,3

Значения независимых переменных в опытах 1 – 8 отвечают матрице ортогонального

линейного плана для трех факторов. В опытах 9 – 20 одна из независимых устанавливалась на

среднем уровне, а две других варьировались по схеме ортогонального линейного плана для двух факторов. Опыты в центре плана 21 – 25 проводились для оценки воспроизводимости откликов.

Оценки коэффициентов уравнений регрессии (8) вычисляли методом наименьших квадратов по формулам:

$$B_i = (X_i^T X_i)^{-1} (X_i^T Y_i), i = 1, 2, \quad (9)$$

где  $B_i$  – коэффициенты уравнений регрессии, отвечающие каждому отклику;  $X$  – информационная матрица, столбцы которой соответствуют коэффициентам уравнения регрессии;  $X^T$  – транспонированная матрица;  $Y_i$  – столбцы откликов.

Вычисленные оценки коэффициентов регрессии приведены в табл. 4.

#### 4. Оценки коэффициентов уравнений регрессии

Коэффициент	$y_1$	$y_2$
$b_0$	5,8755	26,2389
$b_1$	0,1769	-0,3670
$b_2$	0,5450	0,4587
$b_3$	0,4663	-0,7330
$b_{12}$	-0,3408	0,0427
$b_{13}$	0,1158	-0,3578
$b_{23}$	0,4583	-0,4527
$b_{221}$	1,5525	-0,9420
$b_{222}$	0,2750	-0,5599
$b_{223}$	-3,1550	-4,5512
$b_{123}$	0,7438	0,5199

В качестве статистики для проверки гипотезы адекватности математических моделей использовали отношение  $F$  дисперсий адекватности моделей к дисперсиям воспроизводимости, которые вычисляли по результатам параллельных измерений в опытах 21 – 25:

$$F_i = \frac{S_{адi}^2}{S_{восi}^2}, i = 1, 2,$$

где  $S_{адi}^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2$ ; (10)

$$S_{восi}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2,$$

где  $N$  – общее число опытов ( $N = 25$ );  $l$  – число коэффициентов уравнений регрессии, вычисленных по выборке ( $l = 11$ );  $n$  – число параллельных опытов ( $n = 5$ );  $y_{ij}$  – экспериментальные значения откликов;  $\hat{y}_{ij}$  – значения откликов, рассчитанные по уравнению регрессии;  $\bar{y}_i$  – среднее значение откликов по параллельным измерениям.

Статистика  $F$  удовлетворяет распределению Фишера [16]. Поэтому для проверки гипотезы об адекватности уравнений регрессии вычисленные значения статистики для обоих откликов  $F_i$  необходимо сравнить с квантилем распределения Фишера  $F_{inv}$  при выбранной доверительной вероятности  $p$  и числах свободы сравниваемых дисперсий  $N - l$  и  $n - 1$ . Гипотеза об адекватности уравнения принимается при выполнении неравенства:

$$F_i \leq F_{inv}(p, N - l, n). \quad (11)$$

Как видно из результатов проверки, приведенных в табл. 5, для обоих откликов гипотеза об адекватности уравнений регрессии принимается.

#### 5. Результаты проверки гипотезы об адекватности уравнений регрессии

Параметр	$y_1$	$y_2$
$S_{восi}^2$	0,932	2,687
$S_{адi}^2$	1,787	2,389
$F_i$	1,917	0,889
$F_{inv}$	5,873	

В силу ортогональности матрицы планирования вычисленные оценки коэффициентов регрессии линейно независимы, так что любой из коэффициентов может быть исключен из уравнения без необходимости пересчета оставшихся. Поэтому оценки линейных эффектов  $b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}, i = 1, 2$  можно использовать для сравнения степени влияния независимых

переменных на каждый из откликов в линейном приближении. Согласно табл. 4 наиболее сильное влияние на каждый из откликов в рамках принятых интервалов варьирования (см. табл. 2) оказывает фактор  $x_2$  (дистанция). Также можно отметить, что в среднем все три фактора приводят к увеличению  $y_1$  (все линейные эффекты положительны), тогда как для пористости к увеличению  $y_2$  приводит только увеличение  $x_2$ , а для  $x_1$  и  $x_3$  влияние противоположное.

Эти выводы верны лишь в первом линейном приближении. Для того, чтобы более точно оценить влияние независимых переменных на исследованные отклики, необходимо исследовать поверхности откликов в пространстве всех трех независимых переменных, т. к. уравнения регрессии нелинейны. Поскольку для трех независимых переменных зависимости откликов от независимых переменных представляют собой поверхности в четырехмерном пространстве, визуально изучить их невозможно. Можно изучить только сечения таких поверхностей, задав постоянным один из параметров, и построив поверхность в трехмерном пространстве зависимости отклика от двух оставшихся. Либо, если задать постоянными два параметра, то сечение будет представлять собой график на плоскости, как функция отклика от одного оставшегося параметра.

Для построения сечений поверхностей отклика целесообразно предварительно найти их центры и определить качественный вид поверхностей. Центр поверхностей может быть найден из условия:

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = 0; i = 1,2; j = 1,2,3. \quad (12)$$

Если учитывать в уравнениях регрессии (8) эффект тройного взаимодействия факторов  $b_{123}, x_1, x_2, x_3$ , то система уравнений (12) получается нелинейной и решать ее можно будет только численно. Для качественного анализа вида поверхности с учетом линейной независимости коэффициентов регрессии при ортогональной матрице планирования можно найти центр поверхности приближенно, не учитывая в уравнении регрессии эффект тройного взаимодействия факторов. В этом случае система уравнений (12) будет линейной

и в матричном виде ее можно представить следующим образом:

$$Gx = b, \quad (13)$$

где  $x \in R^3$  – неизвестный вектор координат центра поверхности;  $G \in R^3 \times R^3$  – матрица Гессе коэффициентов регрессии  $G_{ij} = \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j}; i = 1,2,3; j = 1,2,3; b \in R^3$  – вектор, компоненты которого равны линейным коэффициентом регрессии с противоположным знаком.

Координаты центра поверхности легко находятся из решения (13):

$$x^* = G^{-1}b, \quad (14)$$

где  $G^{-1}$  – обратная матрица Гессе.

Вид поверхности можно оценить на основании собственных значений матрицы Гессе  $G^i, i = 1,2,3$ : если все они имеют одинаковые знаки, то в центре поверхности экстремум, в противном случае центр поверхности представляет собой седловую точку.

Результаты качественного исследования поверхностей отклика приведены в табл. 6, из которой видно, что в центре поверхность отклика для функции  $y_1$  (электрическое сопротивление) представляет собой минимакс (знаки  $G^i$  разные), а для для функции  $y_2$  (пористость) в центре поверхность имеет максимум (все  $G^i$  отрицательные).

**6. Результаты качественного анализа вида поверхностей отклика**

Параметр	$y_1$	$y_2$
$x_1^*$	-0,177	-0,167
$x_2^*$	-1,093	0,442
$x_3^*$	-0,009	-0,096
$G^1$	3,150	-9,145
$G^2$	0,538	-1,874
$G^3$	-6,342	-1,086

Графики сечений поверхностей приведены на рис. 3 и 4, где для функции  $y_1(x_1, x_2, x_3)$  сечение (поверхность  $y_1(x_1, x_3)$ ) выбрано в точке центра  $x_2 = -1.093$ , а для

функции  $y_2(x_1, x_2, x_3)$  сечение (поверхность  $y_1(x_1, x_2)$ ) – в точке центра  $x_3 = -0.096$ . Как видно, в точке центра поверхности  $y_2(x_1, x_2, x_3)$  пористость покрытия достигает максимального значения. При этом координаты частных экстремумов зависимости электрического сопротивления от исследуемых факторов по переменным  $x_1, x_3$  близки соответствующим координатам частных экстремумов для зависимости пористости. Однако если для  $x_1$  (зависимость от силы тока) зависимости  $y_1(x_1)$  и  $y_2(x_1)$  в точках  $x_1^*$  имеют максимум, то зависимость  $y_1(x_3)$  в точке  $x_3^*$  имеет минимум, в отличие от  $y_2(x_3)$  в соответствующей точке. Что касается сечений  $y_1(x_2)$  и  $y_2(x_2)$ , то для них не совпадают как координаты частных экстремумов, так и их вид (знаки вторых производных в соответствующих точках). Сечение  $y_1(x_2)$  в точке  $x_2^*$  имеет минимум, а сечение  $y_2(x_2)$  в соответствующей особой точке – максимум. Следует отметить, что экстремум кривой сечения  $y_1(x_2)$  находится за пределами области варьирования факторов (табл. 6), а абсолютное значение квадратичного эффекта  $b_{222}$  (табл. 4) существенно меньше соответствующих абсолютных значений других факторов  $b_{221}$  и  $b_{223}$ . Так что можно утверждать, что в исследованном диапазоне варьирования параметра  $x_2$  зависимость  $y_1(x_2)$  является монотонно возрастающей.

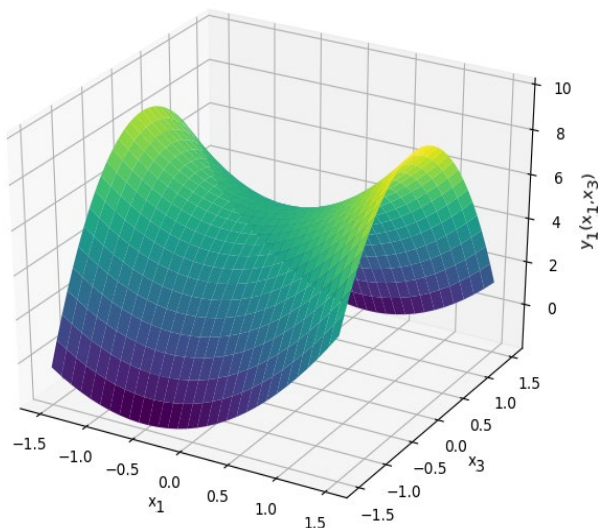


Рис. 3. График сечения поверхности  $y_1(x_1, x_2, x_3)$  в точке  $x_2 = -1.093$

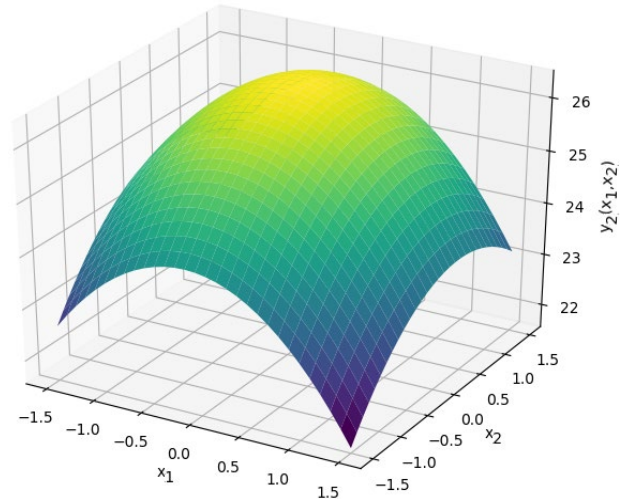


Рис. 4. График сечения поверхности  $y_2(x_1, x_2, x_3)$  в точке  $x_3 = -0.096$

Таким образом, как показывает проведенный анализ, между пористостью покрытий и их электрическим сопротивлением нет однозначной зависимости, как этого можно было бы первоначально ожидать. Это подтверждается также расчетом коэффициента корреляции между этими показателями по данным табл. 3. Вычисленная его оценка составила значение  $0.46 \pm 0.26$  (с доверительной вероятностью 0.95), что является сравнительно невысоким значением.

### Заключение

В настоящей работе с использованием метода математического планирования эксперимента исследована зависимость электрического сопротивления и пористости плазменных порошковых покрытий оксидом алюминия на металлическую подложку от следующих технологических факторов: ток плазмотрона, дистанция до подложки и расход водорода. Установлено, что зависимость пористости покрытия от всех трех изученных факторов проходит через максимум, тогда как зависимость электрического сопротивления имеет максимум по расходу водорода и минимум по току плазмотрона. При этом электрическое сопротивление в исследованном диапазоне варьирования дистанции до подложки монотонно возрастает с увеличением ее значения. Наблюдается положительная, хотя и невысокая, корреляция между пористостью покрытия и его электрическим сопротивлением.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А.** Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов. Минск: БНТУ, 2019. 231 с.
2. **Газотермическое напыление** / под общей ред. Л. Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
3. **Davis J. R.** Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338
4. **Кудинов В. В., Бобров Г. В.** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Metallurgiya, 1992. 432 с.
5. **Dolmaire A., Hartikainen E., Goutier S. et al.** Benefits of Hydrogen in a Segmented-Anode Plasma Torch in Suspension Plasma Spraying // J Therm Spray Tech. 2021. V. 30. P. 236–250; <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01134-2>
6. **Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громько Г.Ф.** Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларус навука, 2011. 357 с.
7. **Kuzmin V., Gulyaev I., Sergachev D., et al.** Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). 2017. V. 129. ID 01052; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901052>
8. **Aruna S.T., Balaji N., Shedthi J., Grips V.K.** Effect of critical plasma spray parameters on the microstructure, microhardness and wear and corrosion resistance of plasma sprayed alumina coatings // Surface & Coatings Technology. 2012. V. 208. P. 92–100; <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.016>
9. **Sahab A.R.M, Saad N.H., Kasolang S., Saedon J.** Impact of Plasma Spray Variables Parameters on Mechanical and Wear Behaviour of Plasma Sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3%wt TiO<sub>2</sub> Coating in Abrasion and Erosion Application // Procedia Engineering. 2012. V.41 P. 1689–1695; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.369>.
10. **Sarikaya O.** Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process // Surface and Coatings Technology. 2005. V. 190. № 2–3. P. 388–393; <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.007>.
11. **Swindeman C. J., Seals R. D., White R.L. et al.** An investigation of the electrical behavior of thermally-sprayed aluminum oxide // Proc. of the National Spray Conf. Cincinnati, OH (United States), 7-11 Oct 1996. 1996. ID 378860; <https://doi.org/10.2172/378860>.
12. **Odhiambo J.G., WenGe Li W., Zhao Y., Li C.** Porosity and Its Significance in Plasma-Sprayed Coatings // Coatings. 2019. V. 9 (7). P. 460; <https://doi.org/10.3390/coatings9070460>

13. **Curran J.A., Clyne T.W.** Porosity in plasma electrolytic oxide coatings // Acta Materialia. 2006. V. 54. P. 1985–1993; <https://doi:10.1016/j.actamat.2005.12.029>
14. **Gonzalez R.C., Woods R.E.** Digital image processing, 4 ed. N.Y.: Pearson. 2018. 1009 p.
15. **Ермаков С.М., Бродский В.З., Жиглявский А.А. и др.** Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С.М. Ермакова. М.: Наука. 1983. 392 с.
16. **Учеб. пособие.** 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 327 с.

## REFERENCES

1. Panteleenko F.I., Okovity V.A. Formation of multi-functional plasma coatings based on ceramic materials. Minsk. BNTU Publ., 2019, 231 p. (in Russian).
2. Gas thermal spraying / under the general editorship of L.H. Baldaev. Moscow: Market DS, 2007, 344 p.
3. Davis J. R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338
4. Kudinov V. V., Bobrov G. V. Spray coating. The theory, technology and equipment. Moscow: Metallurgiya, 1992, 432 p. (in Russian).
5. Dolmaire A., Hartikainen E., Goutier S. et al. Benefits of Hydrogen in a Segmented-Anode Plasma Torch in Suspension Plasma Spraying // J Therm Spray Tech. 2021. V. 30. P. 236–250 <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01134-2>
6. Ilyushenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.A., Gromyko G.F. Processes of formation of gas-thermal coatings and their modeling. Minsk: Belarus navuka, 2011, 357 p. (in Russian).
7. Kuzmin V., Gulyaev I., Sergachev D., et. al. Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). 2017. V. 129. ID 01052; <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901052>
8. Aruna S.T., Balaji N., Shedthi J., Grips V.K. Effect of critical plasma spray parameters on the microstructure, microhardness and wear and corrosion resistance of plasma sprayed alumina coatings // Surface & Coatings Technology. 2012. V. 208. P. 92–100; <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.016>
9. Sahab A.R.M, Saad N.H., Kasolang S., Saedon J. Impact of Plasma Spray Variables Parameters on Mechanical and Wear Behaviour of Plasma Sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3%wt TiO<sub>2</sub> Coating in Abrasion and Erosion Application // Procedia Engineering. 2012. V.41 P. 1689–1695; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.369>.
10. Sarikaya O. Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process // Surface and Coatings Technology. 2005. V. 190. № 2–3. P. 388–393; <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.007>.

11. Swindeman C. J., Seals R. D., White R.L. et al. An investigation of the electrical behavior of thermally-sprayed aluminum oxide // Proc. of the National Spray Conf. Cincinnati, OH (United States), 7-11 Oct 1996. 1996. ID 378860; <https://doi.org/10.2172/378860>.

12. Odhiambo J.G., WenGe Li W., Zhao Y., Li C. Porosity and Its Significance in Plasma-Sprayed Coatings // Coatings. 2019. V. 9 (7). P. 460; <https://doi.org/10.3390/coatings9070460>

13. Curran J.A., Clyne T.W. Porosity in plasma electrolytic oxide coatings // Acta Materialia. 2006. V. 54. P. 1985–1993; <https://doi:10.1016/j.actamat.2005.12.029>

14. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. 4-th ed. N.Y.: Pearson. 2018. 1009 p.

15. Ermakov S.M., Brodsky V.Z., Zhiglyavsky A.A., et.al. Mathematical theory of experiment planning / Edited by S.M. Ermakov. Moscow: Nauka, 1983, 392 p. (in Russian).

16. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Methods of experiment optimization in chemical technology. Study guide. 2-nd ed., updated and revised. Moscow: Higher School, 1985, 327 p. (in Russian)

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

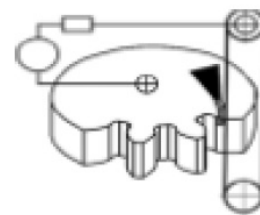
**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.03.2023; одобрена после рецензирования 17.03.2023; принята к публикации 22.03.2023

The article was submitted 09.03.2023; approved after reviewing 17.03.2023; assepted for publication 22.03.2023







Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 33-39.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 33-39.

Научная статья  
УДК 621.7.075  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-33-39

## Оценка влияния ультразвуковых колебаний на напряженное состояние поверхностного слоя отверстия, обработанного методом калибрования

Валерий Александрович Лебедев<sup>1</sup>, к.т.н.,  
Юрий Алексеевич Тороп<sup>2</sup>, аспирант,  
Андрей Николаевич Кочетов<sup>3</sup>, к.т.н.,  
Николай Сергеевич Коваль<sup>4</sup>, к.т.н.

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Донской государственный технический университет

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

<sup>2</sup> yuriy.torop87@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2722-8107>

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

<sup>4</sup> koval-nc@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5787-9621>

*Аннотация.* Предложена технологическая схема калибрования отверстий в деталях типа втулка, диски, зубчатое колесо, в условиях приложения ультразвукового воздействия на деталь. Выведена формула с помощью которой можно варьировать величину ультразвукового импульса  $r_{\text{в}}$  на деталь, что позволяет обеспечить требуемую точность отверстия при более пониженных давлениях в зоне контакта дорна с обрабатываемой поверхностью и как следствие уменьшить величину тягового усилия процесса калибрования, что особенно важно при обработке отверстий в деталях, подвергаемых термообработке.

*Ключевые слова:* калибрование, дорн, цилиндрическое отверстие, тяговое усилие, энергия ультразвукового поля, напряженное состояние поверхностного слоя, качество поверхности отверстия

*Для цитирования:* Лебедев В.А., Тороп Ю.А., Кочетов А.Н., Коваль Н.С. Оценка влияния ультразвуковых колебаний на напряженное состояние поверхностного слоя отверстия, обработанного методом калибрования // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 33–39. doi: 10.30987/2223-4608-2023-33-39

## Impact assessment of ultrasonic vibrations on the stress state of the hole surface layer when treated by the calibration method

Valery A. Lebedev, D.Eng.,  
Yuri A. Torop, PG student,  
Andrey N. Kochetov, PhD Eng.,  
Nikolay S. Koval, PhD Eng.  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> Don State Technical University  
<sup>1</sup> va.lebidev@yandex.ru,  
<sup>2</sup> yuriy.torop87@mail.ru,  
<sup>3</sup> ankochetow@yandex.ru,  
<sup>4</sup> koval-nc@mail.ru

**Abstract.** A design project for calibrating holes in parts, e.g. in hobs, discs, gear wheels, under conditions of ultrasonic effects application is suggested. Formula, providing a way for varying the value of the ultrasonic pulse pbr in a part is derived. It allows ensuring the required accuracy of the hole at lower pressures in the contact zone of a mandrel with the treated surface and, as a consequence, to reduce the magnitude of the traction force of the calibration process, which is especially important in hole-making operations for parts subjected to heat treatment.

**Keywords:** calibration, mandrel, cylindrical hole, traction force, ultrasonic field energy, stress state of the surface layer, hole surface condition

**For citation:** Lebedev V.A., Torop Yu. A., Kochetov A.N., Koval N.S. Impact assessment of ultrasonic vibrations on the stress state of the hole surface layer when treated by the calibration method / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 33–39. doi: 10.30987/2223-4608-2023-33-39

## Введение

Калибрование является одним из эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки отверстий различной формы. Метод позволяет получить геометрические размеры отверстий с высокой точностью, а также в результате поверхностной пластической деформации, сформировать поверхностный слой с повышенными физико-механическими характеристиками [1, 2]. Особенно востребован этот метод при отделочно-упрочняющей обработке отверстий в деталях, изготавливаемых из труднообрабатываемых материалов и подвергаемых термообработке после выполнения формообразующих операций [2].

Для реализации процесса калибрования отверстий на сегодняшний день, в результате проведенных исследований, разработана конструкция дорна, определены геометрические параметры его рабочих поверхностей и установлены технологические параметры процесса, обуславливающие механизм поверхностного пластического деформирования, среди которых особо следует выделить натяг и скорость дорнования от правильного выбора которых зависит величина тягового усилия [2, 3].

Определение тягового усилия при дорновании отверстий имеет большое практическое значение, т. к., зная заранее величину усилия, можно правильно выбрать конструктивные размеры протяжного станка или пресса, рассчитать инструменты, приспособления и обрабатываемую деталь на прочность и устойчивость. Поэтому его уменьшению в процессе обработки уделяется особое внимание. Снижение тягового усилия

может быть обеспечено или уменьшением коэффициента внешнего трения в зоне контактного взаимодействия дорна с обрабатываемой поверхностью путем применения смазок или изменением напряжённого состояния поверхностного слоя в зоне контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, приводящего к снижению внутреннего трения в материале путем введения в зону обработки ультразвуковых колебаний (УЗК).

Анализ выполнения различных технологических операций резанием с применением ультразвуковых колебаний предусматривает в основном наложение их на инструмент вдоль его оси. Однако такая схема введения ультразвуковых колебаний в очаг деформации возможна только при создании специальных станков с вмонтированными ультразвуковыми преобразователями, подходит только для определенной группы деталей и характеризуется высокой материалоемкостью технологической оснастки из-за её больших габаритов [4, 5, 6].

Целью настоящих исследований является оценка влияния ультразвуковых колебаний, при наложении их на деталь, на изменение напряженного состояния деформированного в процессе калибрования поверхностного слоя.

## Расчет напряженного состояния поверхностного слоя отверстия деформированного в процессе калибрования и действия ультразвукового поля

На рис. 1 представлена технологическая схема реализации процесса калибрования отверстий, в соответствии с которой

формирование и как следствие изменение напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя отверстий является результатом совместного энергосилового

воздействия на него упруго пластических деформаций со стороны дорна и ультразвуковых колебаний [4].

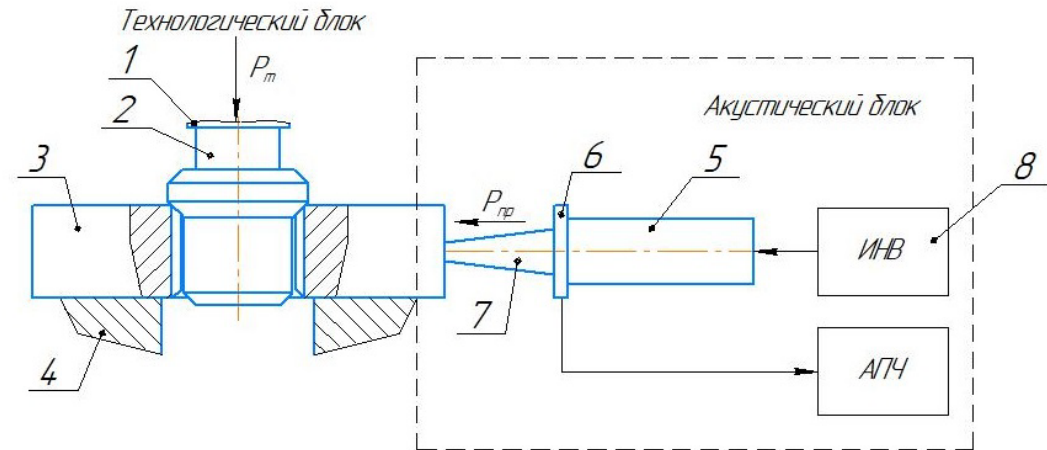


Рис. 1. Схема процесса калибровки отверстий с применением ультразвукового поля:

1 – силовой шток; 2 – дорн; 3 – деталь; 4 – установочный стол; 5 – магнитоstrictionный преобразователь; 6 – датчик акустической обратной связи; 7 – волновод; 8 – генератор (АПЧ – система автоподстройки частоты, ИНВ – инвертор)

Рассмотрим деформированный поверхностный слой отверстия в виде цилиндра из упругого материала, подчиняющегося закону Гука, толщиной равной величине натяга  $\delta$  и высотой равной длине отверстия  $H$ , соизмеримой с высотой детали (рис. 2). Цилиндр находится под внутренним давлением, равного по величине радиальному контактному давлению дорна в точке его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью и внешним давлением  $p_b$ , соответствующего величине давления, развиваемого ультразвуковыми колебаниями (см. рис. 2) при постоянной температуре  $T = T_0$ , соответствующей температуре при отсутствии деформаций. При этом считаем, что перемещения имеют место в поперечном направлении, а в осевом направлении отсутствуют.

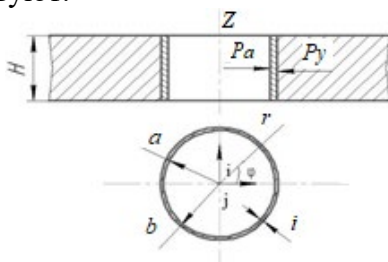


Рис. 2. Схема цилиндра, охватывающего деформированный поверхностный слой отверстия под давлением на него внутренних и внешних сил

Примем за начальное состояние поверхностного слоя, его состояние в условиях, когда  $p_a = p_b = 0$ , при которых деформации и напряжения отсутствуют и соответственно тензор деформации  $\varepsilon_{ij} = 0$ . Перемещения  $\omega$  от начального до напряженно-деформированного состояния происходят в поверхностном слое, когда  $p_a$  и  $p_b > 0$ .

Для решения поставленной задачи используем следующие основные кинематические уравнения теории упругости, принятые при исследовании механики сплошных сред:

– уравнения равновесия (без учета массовых сил):

$$\nabla_j p^{ij} = 0, \quad (1)$$

где  $p^{ij}$  – компоненты тензора напряжений;

$$\nabla_j p^{ij} = \frac{dp^{ki}}{dx^i} + \sum p^{ij} \Gamma_{ij}^k;$$

где  $\Gamma_{ij}^k$  – символ Кристоффеля.

– закон Гука для изотропной среды в произвольной криволинейной системе координат:

$$p^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g^{ij} + 2\mu \varepsilon^{ij}, \quad (2)$$

где  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ламе;  $g^{ij}$  – метрический тензор в системе координат,  $g^{ij} = (\exists^i, \exists^j)$ ;  $\exists^i$  – базисные векторы метрического тензора;  $I_1(\epsilon)$  – первый инвариант тензора деформаций.

– выражения тензоров деформации через перемещения, при условии малых деформаций:

$$\epsilon_{ij} = 0,5(\nabla_i \omega_j + \nabla_j \omega_i), \quad (3)$$

где  $\omega_j, \omega_i$  – компоненты вектора перемещений;

$$\nabla_i \omega_j = \frac{d\omega_j}{dx^i} - \omega_k \Gamma_{ij}^k.$$

Установим граничные условия на внутренней и внешней стороне цилиндра (рис. 2) записав:

$$\begin{aligned} p_n &= -p_a n, \text{ при } r = a; \\ p_n &= -p_b n, \text{ при } r = b, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $a$  – радиус внутренней поверхности цилиндра,  $a = d/2$ ;  $b$  – внешний радиус цилиндра,  $b = d/2 + i$ ;  $n$  – нормаль к боковым поверхностям цилиндра;  $d$  – внутренний диаметр отверстия до деформирования.

Для выполнения граничных условий считаем, что перемещения частиц цилиндра в радиальном направлении малы.

Граничные условия для цилиндра длиной  $H$  на торцах при  $z = 0$  и  $z = H$  запишем в виде:

$$\omega_{n\tau} = 0; p_{n\tau} = 0, \text{ при } z = 0 \text{ и } z = H, \quad (5)$$

где  $n\tau$  – нормаль к торцевым поверхностям цилиндра.

Условие  $p_{n\tau} = 0$  связано с допущением, что в осевом направлении перемещения отсутствуют.

Если принять, что процесс деформирования отверстия при калибровании и ультразвуковом воздействии носит осесимметричный характер для дальнейших рассуждений целесообразно использовать цилиндрическую систему координат, в которой координаты точек обозначим через  $x^1 = r, x^2 = \varphi, x^3 = z$  (рис. 2).

Согласно [7] квадрат модуля вектора перемещения  $dr$  в цилиндрической системе координат определяется из выражения:

$$ds^2 = g_{ij} dx^i dx^j = dr^2 + r^2 d\varphi^2 + dz^2. \quad (6)$$

В соответствии с выражением (6) матрицы метрического тензора имеют вид:

$$\|g_{ij}\| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \|g^{ij}\| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

а определяющие их базисные векторы равны:

$$\begin{aligned} [\exists_1] &= 1; [\exists_2] = r; [\exists_3] = 1; \\ [\exists^1] &= 1; [\exists^2] = \frac{1}{r}; [\exists^3] = 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Для определения символов Кристоффеля  $\Gamma_{ij}^k$  в цилиндрической системе координат воспользуемся формулой [7]:

$$\Gamma_{ij}^k = 0,5 g^{ks} \left( \frac{dg_{is}}{dx^i} + \frac{dg_{js}}{dx^j} - \frac{dg_{ij}}{dx^s} \right). \quad (9)$$

На основе (9) и матрицы (7) получим следующие значения символов:

$$\Gamma_{22}^1 = -r; \Gamma_{12}^2 = 1/r; \Gamma_{21}^2 = 1/r; \quad (10)$$

для всех остальных вариаций матрицы  $\Gamma_{ij}^k = 0$

С целью оценки влияния ультразвуковых колебаний на изменение напряженного состояния деформированного в процессе калибрования поверхностного слоя, при наложении их на деталь, в рамках настоящего исследования решим задачу, предусматривающую, что все искомые функции зависят только от координаты  $r$ . Тогда для вектора перемещений  $\omega$  можно записать:

$$\omega_1 = \omega(r), \quad \omega_2 = \omega_3 = 0. \quad (11)$$

Составим уравнения компонент тензора деформаций, применив выражение (3):

$$\epsilon_{11} = \nabla_1 \omega_1 = \left( \frac{d\omega_1}{dr} - \omega_k \Gamma_{11}^k \right) = \frac{d\omega}{dr};$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{22} &= \nabla_2 \omega_2 = \left( \frac{d\omega_2}{d\varphi} - \omega_k \Gamma_{22}^k \right) = \omega r ; \\ \varepsilon_{33} &= \nabla_3 \omega_3 = \left( \frac{d\omega_3}{dz} - \omega_k \Gamma_{33}^k \right) = 0; \\ \varepsilon_{12} &= 0,5(\nabla_1 \omega_2 + \nabla_2 \omega_1) = 0,5 \left( \frac{d\omega_2}{dr} + \frac{d\omega_1}{d\varphi} - 2\omega_k \Gamma_{12}^k \right) = 0; \\ \varepsilon_{13} &= 0,5(\nabla_1 \omega_3 + \nabla_3 \omega_1) = 0,5 \left( \frac{d\omega_3}{dr} + \frac{d\omega_1}{dz} - 2\omega_k \Gamma_{13}^k \right) = 0; \\ \varepsilon_{23} &= 0,5(\nabla_2 \omega_3 + \nabla_3 \omega_2) = 0,5 \left( \frac{d\omega_3}{d\varphi} + \frac{d\omega_2}{dz} - 2\omega_k \Gamma_{23}^k \right) = 0.\end{aligned}\quad (12)$$

Первый инвариант тензора деформаций согласно [7] определим как сумму его основных компонентов:

$$I_1(\varepsilon) = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})g^{ij} = \frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в формулу закона Гука (2), получим выражения для компонентов тензора напряжений:

$$\begin{cases} p^{11} = \lambda \left( \frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right) + 2\mu \frac{d\omega}{dr}; \\ p^{22} = \lambda \left( \frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right) \frac{1}{r^2} + 2\mu \frac{\omega}{r^3}; \\ p^{33} = \lambda \left( \frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right).\end{cases} \quad (14)$$

Из (14) и (11) запишем граничные условия на боковых поверхностях условно выделенного цилиндра, охватывающего деформированный в процессе калибрования и ультразвукового воздействия поверхностный слой:

$$p^{11} = (\lambda + 2\mu) \frac{d\omega}{dr} + \lambda \frac{\omega}{r} = -p_a, \text{ при } r = a; \quad (15)$$

$$p^{11} = (\lambda + 2\mu) \frac{d\omega}{dr} + \lambda \frac{\omega}{r} = -b, \text{ при } r = b. \quad (16)$$

Запишем уравнение равновесия (1) в проекции на ось  $x^1 = r$  в соответствии с условием (11):

$$\frac{dp^{11}}{dr} + p^{22}\Gamma_{22}^1 + p^{11}\Gamma_{12}^2 = 0. \quad (17)$$

С учетом выражений (14) и значений  $\Gamma_{ij}^k$  (10) уравнение равновесия будет иметь вид:

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right) = 0. \quad (18)$$

Продифференцировав (18), получим соотношение:

$$\left( \frac{d\omega}{dr} + \frac{\omega}{r} \right) = \frac{1}{r} \frac{d\omega r}{dr} = \text{const},$$

из которого следует зависимость вида:

$$\omega = Ar + \frac{B}{r}, \quad (18)$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты, которые можно найти, используя граничные условия (15) и (16) представив их следующим образом:

$$2((\lambda + \mu)A - \frac{2\mu B}{a^2}) = -p_a; \quad (19)$$

$$2((\lambda + \mu)A - \frac{2\mu B}{b^2}) = -p_b. \quad (20)$$

Путем совместного решения (19) и (20) получены следующие формулы для определения коэффициентов  $A$  и  $B$ :

$$A = \frac{a^2 p_a - b^2 p_b}{2(\lambda + \mu)(b^2 - a^2)}, \quad (21)$$

$$B = \frac{a^2 b^2 (p_a - p_b)}{2\mu(b^2 - a^2)}. \quad (22)$$

Установленные, в результате проведенного исследования, зависимости (12), (14), (18), (21), (22) являются основой оценки деформаций и напряжений в различных точках цилиндра и, как следствие, поверхностного слоя, модифицируемого в процессе малых упругопластических деформаций.

Используя эти зависимости проведем анализ напряженного состояния стенок цилиндра, ограничивающего деформированный поверхностный слой. Для этого применим подход, предложенный в работе [7], суть которого заключатся в том, что для наилучшего представления о действительной величине напряжений предлагается использовать, так называемые «физические компоненты» тензоров напряжений, т. е. компоненты единичного базисного вектора  $p_{\phi}^{ij}$ . Так как в нашем случае компоненты единичного базисного вектора совпадают главными

компонентами тензора напряжений можно записать:

$$p_{\phi}^{11} = p^{11}; p_{\phi}^{22} = r^2 p^{22}; p_{\phi}^{33} = p^{33}. \quad (22)$$

Введя обозначения  $p_{\phi}^{11} = p_{rr}$ ,  $p_{\phi}^{22} = p_{\phi\phi}$ ,  $p_{\phi}^{33} = p_{zz}$ , из (14), с учетом (18), (19),

$$\begin{cases} p_{rr} = p^{11} = \frac{a^2 p_a}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right) - \frac{b^2 p_b}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right); \\ p_{\phi\phi} = r^2 p^{22} = \frac{a^2 p_a}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) - \frac{b^2 p_b}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right); \\ p_{zz} = p^{33} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \frac{a^2 p_a - b^2 p_b}{b^2 - a^2}. \end{cases} \quad (22)$$

Выразим коэффициенты  $\lambda$  и  $\mu$  через постоянные Ламе:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (23)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $a$  и  $b$  определяются:  $a = d/2$ ,  $b = d/2 + \delta$ , где  $d$  – диаметр исходного

(20) (21), (22) после преобразований получим в общем виде уравнения, описывающие напряженное состояние точек деформированного поверхностного слоя, охватываемого условным цилиндром:

отверстия до калибрования;  $\delta$  – натяг калибрования.

Уравнения (22) преобразуются к следующему виду:

$$\begin{cases} p_{rr} = \frac{4d^2 p_a}{(d+2\delta)^2 - 4d^2} \left(1 - \frac{(d+2\delta)^2}{4r^2}\right) - \frac{4(d+2\delta)^2 p_b}{(d+2\delta)^2 - 4d^2} \left(1 - \frac{d^2}{4r^2}\right); \\ p_{\phi\phi} = \frac{4d^2 p_a}{(d+2\delta)^2 - 4d^2} \left(1 + \frac{(d+2\delta)^2}{4r^2}\right) - \frac{4(d+2\delta)^2 p_b}{(d+2\delta)^2 - 4d^2} \left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right); \\ p_{zz} = 4\nu \frac{d^2 p_a - (d+2\delta)^2 p_b}{(d+2\delta)^2 - 4d^2}. \end{cases} \quad (24)$$

На рис. 3 показано распределение напряжений в деформированном поверхностном слое отверстия при отсутствии ультразвукового воздействия на деталь  $p_b = 0$  (сплошная линия) и ультразвуковым воздействием (пунктирная линия).

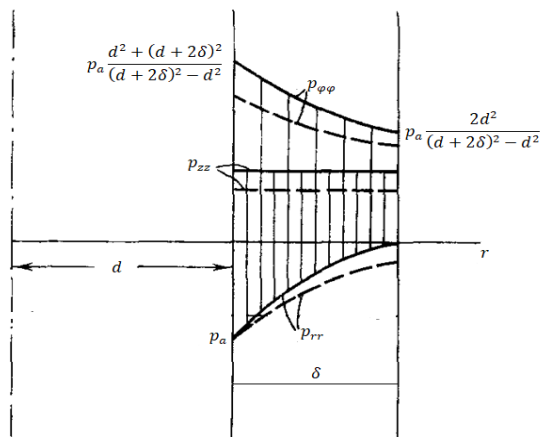


Рис. 3. Распределение напряжений в деформированном поверхностном слое отверстия

Из (24) запишем уравнения показывающие влияние ультразвукового воздействия на изменение величины радиального, окружного и осевого контактного давления деформирования поверхностного слоя в процессе калибрования отверстия:

$$\begin{cases} p_{ar} = \frac{[(d+2\delta)^2 - 4d^2] r^2 p_{rr} \pm (d+2\delta)^2 (4r^2 - d^2) p_{br}}{d^2 [4r^2 - (d+2\delta)^2]}; \\ p_{a\phi} = \frac{[(d+2\delta)^2 - 4d^2] r^2 p_{\phi\phi} \pm (d+2\delta)^2 (4r^2 + d^2) p_{b\phi}}{d^2 [4r^2 + (d+2\delta)^2]}; \\ p_{az} = \frac{[(d+2\delta)^2 - 4d^2] p_{zz} + 4\nu (d+2\delta)^2 p_{bz}}{4\nu d^2}. \end{cases} \quad (25)$$

При калибровании величина пластически деформируемого поверхностного слоя должна находиться в пределах допуска задаваемого на точность обрабатываемого отверстия [IT], то есть  $2\delta \leq [IT]$ . Исходя из этого ограничения и учитывая, что напряжения в поверхностном слое, необходимые для реализации процесса

поверхностно пластической деформации должны превышать предел текучести обрабатываемого материала детали  $\sigma_T$ , запишем формулу для определения минимального контактного радиального давления, обеспечивающего калибрование отверстий в условиях ультразвукового поля:

$$p_{ar} = \frac{[(d+[IT])^2 - 4d^2]r^2\sigma_T - (d+[IT])^2(4r^2 - d^2)p_{br}}{d^2[4r^2 - (d+[IT])^2]} \quad (26)$$

### Заключение

Из предложенной формулы следует, что варьирование величиной ультразвукового импульса  $p_{br}$  на деталь позволяет обеспечить требуемую точность отверстия при более пониженных давлениях в зоне контакта дорна с обрабатываемой поверхностью и, как следствие, уменьшить величину тягового усилия процесса калибрования, что особенно важно при обработке отверстий в деталях подвергаемых термообработке и изготавливаемых из высокопрочных материалов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Проскуряков Ю. Г.** Объемное дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков, В. Н. Романов, А. Н. Исаев. М.: Машиностроение, 1984. 223 с.
2. **Берберов С.А., Лебедев В.А.** Применение фасонных дорнов для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 9 (75). С. 38–41.
3. **Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования** / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд. ИРНИТУ, 2021. 504 с.
4. **Берберов С.А., Лебедев В.А., Тороп Ю.А.** Повышение эффективности процесса дорнования шлицевых отверстий в условиях воздействия ультразвукового поля / Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 9 (189). С. 391–394.

5. **Кисилев Е.С.** Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2003. С. 186.

6. **Агапов С.И., Головкин В.В.** Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука: монография. Самара: Изд. «СНЦ», 2010. 134 с.

7. **Седов Л.И.** Механика сплошной среды. Т. 2, М.: Наука, 1970. 568 с.

8. **Осипенкова Г.А.** Отделочно-упрочняющая обработка с применением ультразвуковых крутильных колебаний / Г.А. Осипенкова, В.Ф. Пегашкин; Мин-во образования и науки РФ: ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2013. 116 с.

### REFERENCES

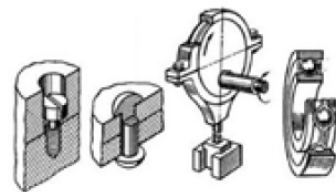
1. Proskuryakov Yu. G. Volumetric mandreling of holes / Yu. G. Proskuryakov, V. N. Romanov, A. N. Isaev. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 223 p. (in Russian).
2. Berberov S.A., Lebedev V.A. Forming mandrel use for slot hole calibration in heat-treated parts / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2017, no. 9 (75), pp. 38–41.
3. Handbook of Surface Plastic Deformation Processes, vol. 2, ed. by S.A. Zaides, Irkutsk: Izdatel'stvo IRNITU, 2022, 584 p. (in Russian).
4. Berberov S.A., Lebedev V.A., Torop Yu.A. Improving in mandrelling efficiency of spline holes under influence of ultrasonic field / Strengthening technologies and coatings, 2020, vol. 16, no. 9 (189), pp. 391–394. (in Russian).
5. Kiselev E.S. Intensification of the processes of mechanical treatment using the ultrasonic field energy: textbook. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2003, p. 186. (in Russian).
6. Agapov S.I., Golovkin V.V. Machining effectiveness increase through ultrasound use: monograph. Samara: SNC Publishing House, 2010, 134 p. (in Russian).
7. Sedov L.I. Mechanics Of Continuous Media (In 2 vols), Moscow: Nauka, 1970, 568 p. (in Russian).
8. Osipenkova G.A. Finishing-hardening treatment using ultrasonic torsion oscillation / G.A. Osipenkova, V.F. Pegashkin; Ministry of Education and Science of the Russian Federation: Federal State Educational Institution of Higher Education "UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin", Nizhnetagil'sk technological institute (branch). Nizhny Tagil: NTI (branch) UrFU, 2013, 116 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 12.02.2023; одобрена после рецензирования 09.03.2023; принята к публикации 20.03.2023

The article was submitted 12.02.2023; approved after reviewing 09.03.2023; assepted for publication 20.03.2023



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 40-48.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 40-48.

Научная статья  
УДК 534-8, 621.9.048.6  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-40-48

### Применение ультразвуковых технологий при получении прессовых соединений

**Сергей Константинович Сундуков**, к.т.н.  
ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет  
(МАДИ), г. Москва, Россия  
sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

***Аннотация.** Статья представляет обзор современных исследований по применению ультразвуковых колебаний в процессе получения прессовых соединений. Основным эффектом, возникающим при наложении ультразвука на запрессовываемые детали, является снижение силы трения. Рассмотрены работы, исследующие влияние ультразвука на трение различных материалов, а также применения данного эффекта при запрессовке.*

***Ключевые слова:** ультразвук, колебания, запрессовка, сила трения*

***Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение инициативных исследований молодыми учеными» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными научного проекта: «Исследование влияния ультразвуковых колебаний на процессы получения неразъемных соединений» № 21-79-00185.*

***Для цитирования:** Сундуков С.К. Применение ультразвуковых технологий при получении прессовых соединений // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-40-48*

### Application of ultrasonic technologies in the production of press joints

**Sergey K. Sundukov**, PhD Eng.  
Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University  
(MADI) Moscow, Russia  
sergey-lefmo@yandex.ru

***Abstract.** The present state research overviews on the use of ultrasonic vibrations in press joints. The main effect occurring in ultrasonic activation for pressed parts is friction force break. The works investigating the effect of ultrasound on the friction of various materials, as well as the application of this effect in pressing are viewed in the article.*

***Keywords:** ultrasound, vibrations, pressing, friction force*

***Acknowledgments:** The work is supported by a grant from the Russian Science Foundation for the priority area of activity of the Russian Science Foundation «Conducting initiative research among young scientists» of the Presidential Program of research projects implemented by leading scientists, including young scientists of the scientific project: «Study of the influence of ultrasonic vibrations on the processes of obtaining permanent compounds» No. 21-79-00185.*



## Введение

Прессовые соединения, применяемые в разных механизмах и узлах машиностроения, передают нагрузку вследствие действия между соединяемыми поверхностями силы трения, значение которой определяется величиной натяга между деталями.

Широкое распространение прессовых соединений связано с такими преимуществами как простота, связанная с тем, что узел формируется только за счёт двух деталей, точность центрирования запрессовываемой детали (для цилиндрических соединений), надёжность работы при больших моментах и ударных нагрузках [1].

Сборка прессовых соединений производится механическим методом или за счёт нагрева и охлаждения соединяемых деталей. Выбор способа сборки зависит от требуемой величины натяга. Сила запрессовки при механическом методе сборки должна превышать силу трения, возникающую в соединении:

$$F_{сб} > F_{тр}$$

Преимуществами метода механической запрессовки является простота и высокая производительность. К недостаткам относятся высокая вероятность повреждения сопрягаемых поверхностей и, как следствие, отсутствие возможности соединения деталей с различного рода функциональными покрытиями.

Поэтому снижение силы трения в процессе соединения является основным направлением совершенствования данного техпроцесса. Так, например, сборка гидропрессовым методом, заключающаяся в подачи масла в зону соединения под большим давлением, позволят снизить силу трения до 15 раз [2].

При использовании метода температурных деформаций сборка осуществляется в зазоре между нагретой охватывающей и охлаждённой охватываемой деталью. Применяемость метода также ограничена для больших величин натяга.

Перспективным способом интенсификации сборки посадок с натягом является применение ультразвуковых технологий.

Сообщение деталям колебаний ультразвуковой частоты приводит к изменению характера силы трения [3, 4]. Возникает эффект наличия между трущимися поверхностями смазочного материала – квазивязкое трение.

Несмотря на значимый эффект, количество исследований по изменению силы трения при ультразвуковых колебаниях, а также по их применению в процессе сборки неразъёмных соединений с натягом, крайне мало. Наибольшее количество исследований посвящено процессам резания с наложением колебаний и взаимодействию пуансона и матрицы при штамповке с наложением колебаний.

Данная работа является обзором научных трудов и патентов по применению ультразвуковых колебаний для снижения силы трения и интенсификации сборочных процессов прессовых соединений.

## Влияние ультразвуковых колебаний на силу трения

В работе [5] дан качественный анализ преобразования сухого трения в квазивязкое (рис. 1) на примере поступательного движения вала во втулке, колеблющейся с ультразвуковой частотой.

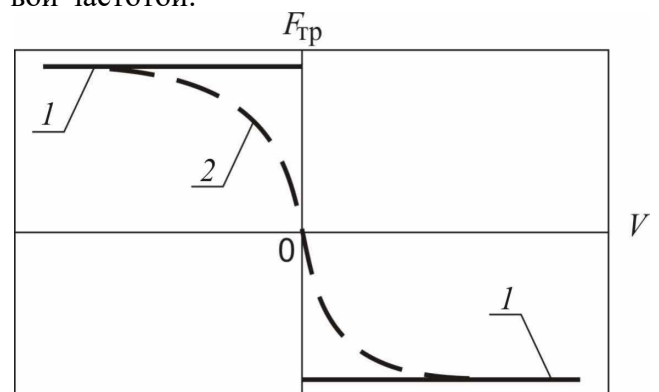


Рис. 1. Качественная зависимость силы сухого трения  $F_{тр}$  от скорости относительного движения  $v$ : 1 – стандартная зависимость; 2 – при наличии быстрых перемещений

В условиях, когда колеблющаяся поверхность движется быстрее, а сила трения направлена в сторону движения вала, то колеблющаяся поверхность передаёт ему часть кинетической энергии и «подтягивает» тело. В

результате средняя сила трения за период колебаний уменьшается.

При этом указано два механизма преобразования трения. Первый является следствием перехода к эффективному трению, усреднённого по ультразвуковым вибрациям, а второй обусловлен созданием смазочного слоя между трущимися поверхностями в результате микроразрушений их поверхностных слоёв.

Статья [6] посвящена экспериментальному исследованию влияния продольных и поперечных колебаний на изменение силы трения. Металлический цилиндр 6×10 мм (алюминиевый сплав BS1474, латунь BS2874,

медь BS2873-74 и нержавеющая сталь BS970) прикреплялся к ультразвуковому концентратору, имеющему резонансную частоту колебаний 20 кГц. Цилиндр прижимался к ответной поверхности (инструментальная сталь BS4659 с твёрдостью 605 HV), прикрепленной к возвратно-поступательному столу, перемещающемуся со средней скоростью 50 мм/с. В процессе эксперимента варьировалась амплитуда от 0 до 12 мкм и усилие прижима от 5,0 до 20 Н. Сила трения измерялась с помощью тензодатчика. Результаты, полученные при исследовании продольных колебаний, представлены на рис. 2.

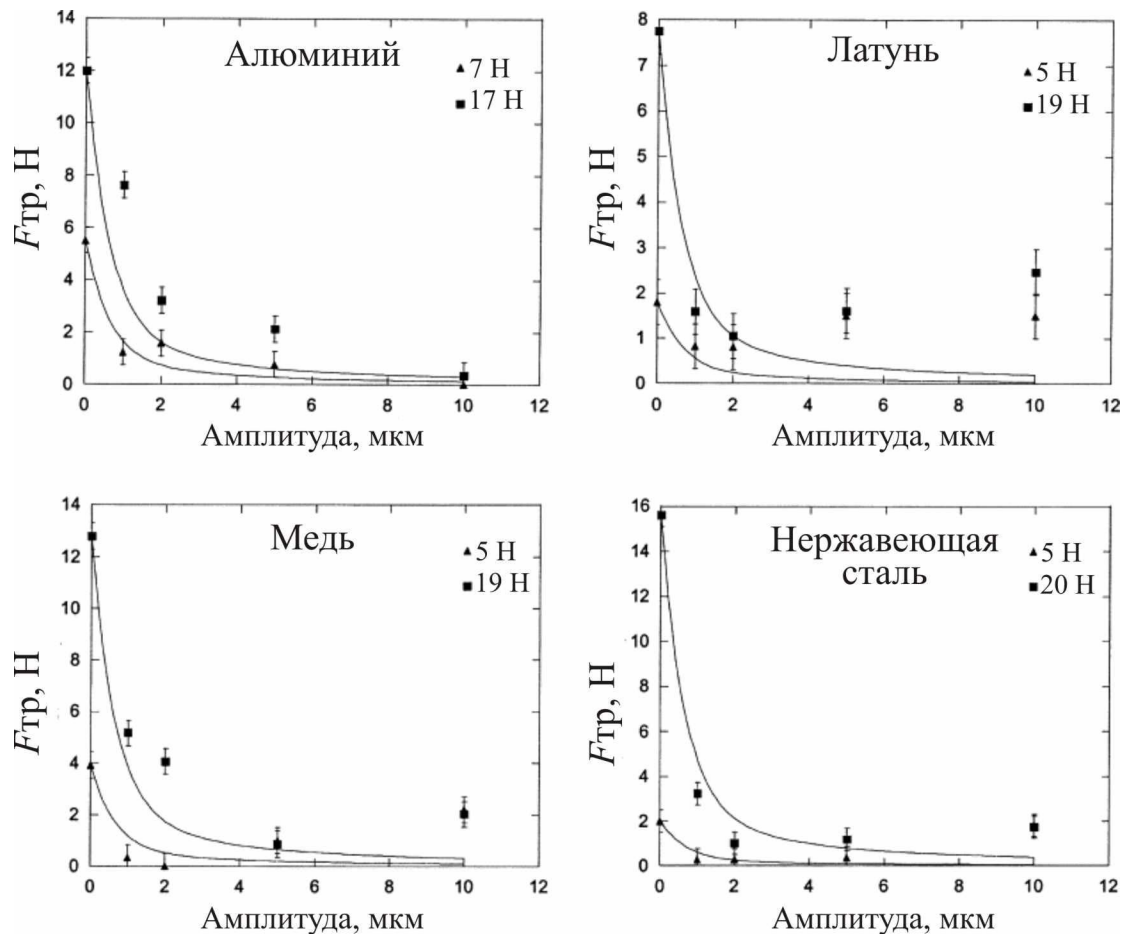


Рис. 2. График зависимости силы трения от амплитуды продольных колебаний для образцов из различных материалов, скользящих по рабочей поверхности из инструментальной стали:

сплошные линии – расчётные данные; отдельные точки – экспериментальные точки

Увеличение амплитуды колебаний приводит к значительному снижению силы трения. Наибольшее снижение достигается до амплитуды 5,0 мкм. При дальнейшем увеличении амплитуды авторы наблюдали перенос металла на контрповерхность, что изменяет

условия трения, в результате чего сила трения повышается. Данный факт не учитывался при расчётах. В итоге сделан вывод, что наилучшие условия снижения трения достигаются в диапазоне от 1,0 до 5,0 мкм. Результаты исследований по влиянию поперечных коле-

баний показали, что сила трения снижается меньше и более плавно.

Исследования [7, 8] по влиянию колебаний на силу трения при малых скоростях

относительно движения проводились по схожей схеме (рис. 3).

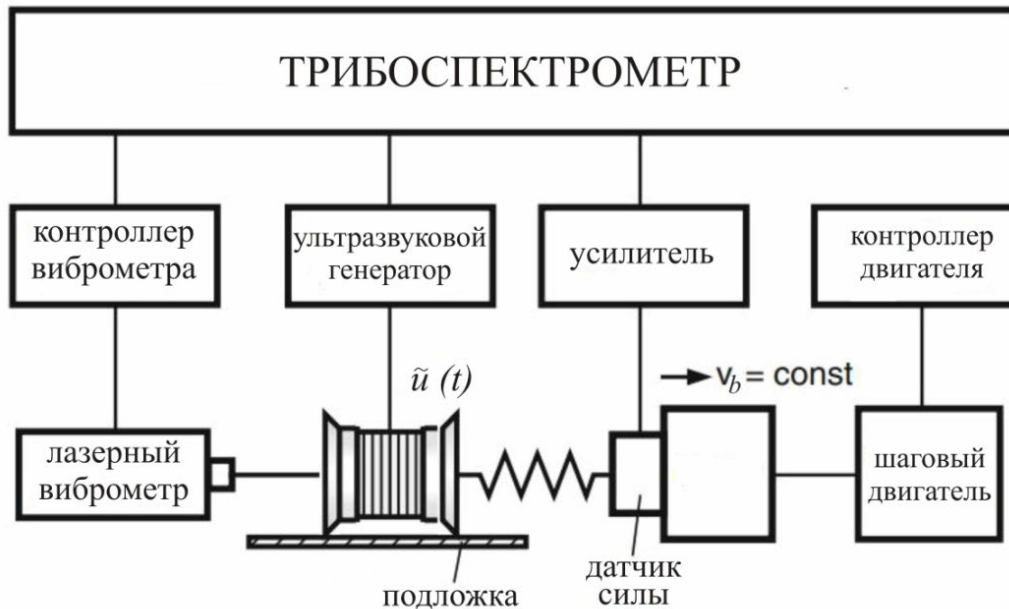


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Колеблющийся с частотой 40...70 кГц образец из стали с пьезокольцами посередине, подключёнными к ультразвуковому генератору, перемещался по подложке из разных материалов со скоростью до 0,05 м/с.

С помощью контрольно-измерительного оборудования определялась величина силы трения при повышении амплитуды колебаний от 0 до 1,0 мкм (рис. 4).

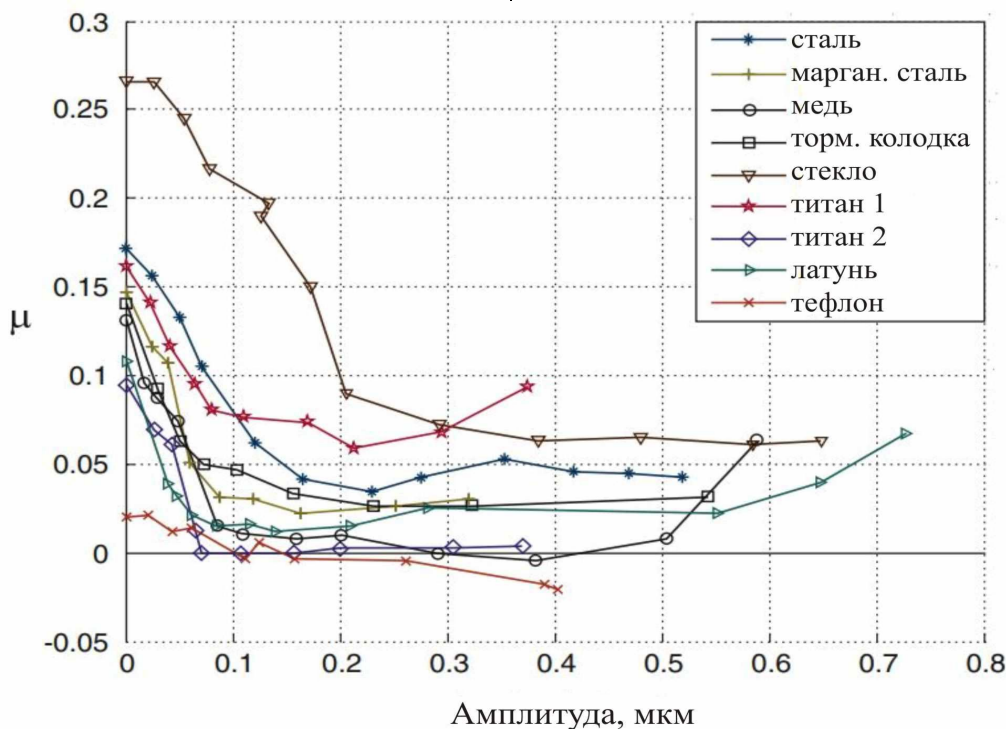


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от амплитуды колебаний

Для всех рассмотренных материалов подложки колебания приводят к снижению коэффициента трения. При этом для значительного снижения достаточно маленькой амплитуды 0,1 мкм. С увеличением скорости скольжения коэффициент трения увеличивается.

Исключения составили образцы из резины и алюминия. При увеличении амплитуды до 1,0 мкм коэффициент трения, наоборот, возрастают.

Авторами [9] произведено сопоставление расчётных данных, основанных на законе трения Кулона, и экспериментальных данных

по изменению силы трения при воздействии ультразвука. Используемая экспериментальная установка аналогична рассмотренным ранее. Принцип её работы основан на перемещении стального образца по алюминиевой направляющей с постоянной скоростью. Проведены эксперименты при параллельной ориентации колебаний и при перпендикулярной. В результате получены зависимости (рис. 5) снижения силы трения при изменении относительной скорости (колебательная скорость к скорости перемещения). При этом частота и амплитуда колебаний не указаны.

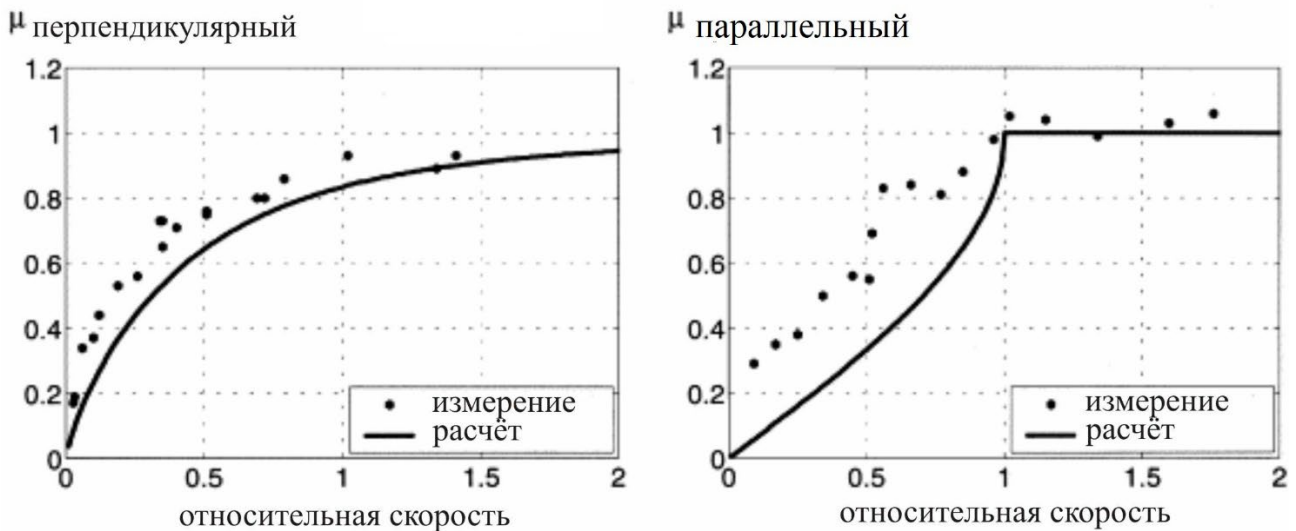


Рис. 5. Измеренное уменьшение трения для параллельного и перпендикулярного наложения компонентов скорости

Полученные измерения подтверждают факт снижения силы трения при ультразвуковом воздействии. Также сделан вывод о применимости закона трения Кулона для описания и прогнозирования характера трения в условиях колебаний.

### Применение ультразвука при получении прессовых соединений

В основе процесса получения прессовых посадок с ультразвуком лежит эффект снижения силы трения под действием колебаний, что рассмотрено выше.

В патенте [10] представлен способ запрессовки вала во втулку с наложением ультразвуковых колебаний. Способ реализуется по следующей схеме (рис. 6)

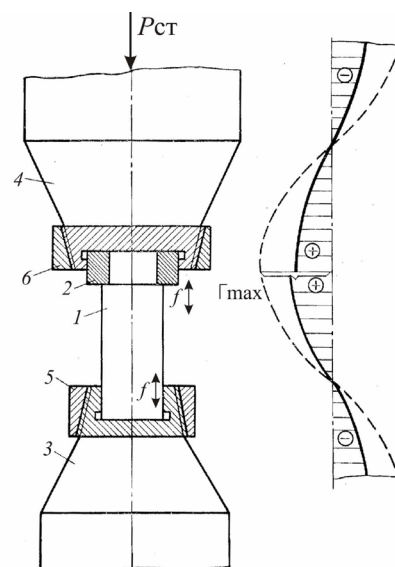


Рис. 6. Схема запрессовки:  
1 – вал; 2 – втулка; 3, 4 – ультразвуковые концентраторы; 5 – цанга для вала; 6 – цанга для втулки

Вал и втулка закрепляются на торцах концентраторов двух направленных друг на друга стержневых колебательных систем. Со стороны одной из деталей прикладывается статическая сила. Далее включаются ультразвуковые колебания в синфазном режиме для обеспечения максимального эффекта в месте сборки. Суммарная амплитуда таких колебаний составляет 4,0...5,0 мкм. Отмечено, что при реализации данной схемы сила трения при запрессовки снижается до четырех раз.

После достижения требуемого положения вала относительно втулки снимется статическое усилие и соединение выдерживается при колебаниях порядка 5,0 с. В результате действия ультразвука разрушаются оксидные плёнки и возникают мостики сварки, что обеспечивает повышение прочности соединения.

Патент [11] рассматривает запрессовку вала во внутреннее кольцо подшипника по аналогичной схеме. Притом в процессе сборки у подшипника вращают наружное кольцо. Совместное действие колебаний и вращатель-

ного движения кольца приводит к упрочнению двух колец подшипника через тела качения, что приводит к повышению долговечности подшипника на 10 % по сравнению реализации такой же схемы без колебаний.

В работе [12] рассматривается вопрос запрессовки зубков из ВК10 шарошечных долот с применением ультразвука. В качестве шарошек использовались плоские диски из стали 19ХГНМА, прошедшие механическую и термическую обработку. Экспериментальный стенд состоял из гидроцилиндра, закреплённого на станине, шток которого соединялся с магнитострикционным преобразователем ПМС 2,5-18 с концентратором из закалённой стали. Питание преобразователя осуществлялось ультразвуковым генератором УЗГ 3-4. При амплитуде колебаний 20 мкм и частоте 22000 Гц получали соединения с натягом 11 мкм. В процессе контролировались усилия запрессовки и далее распрессовки образцов (рис. 7).

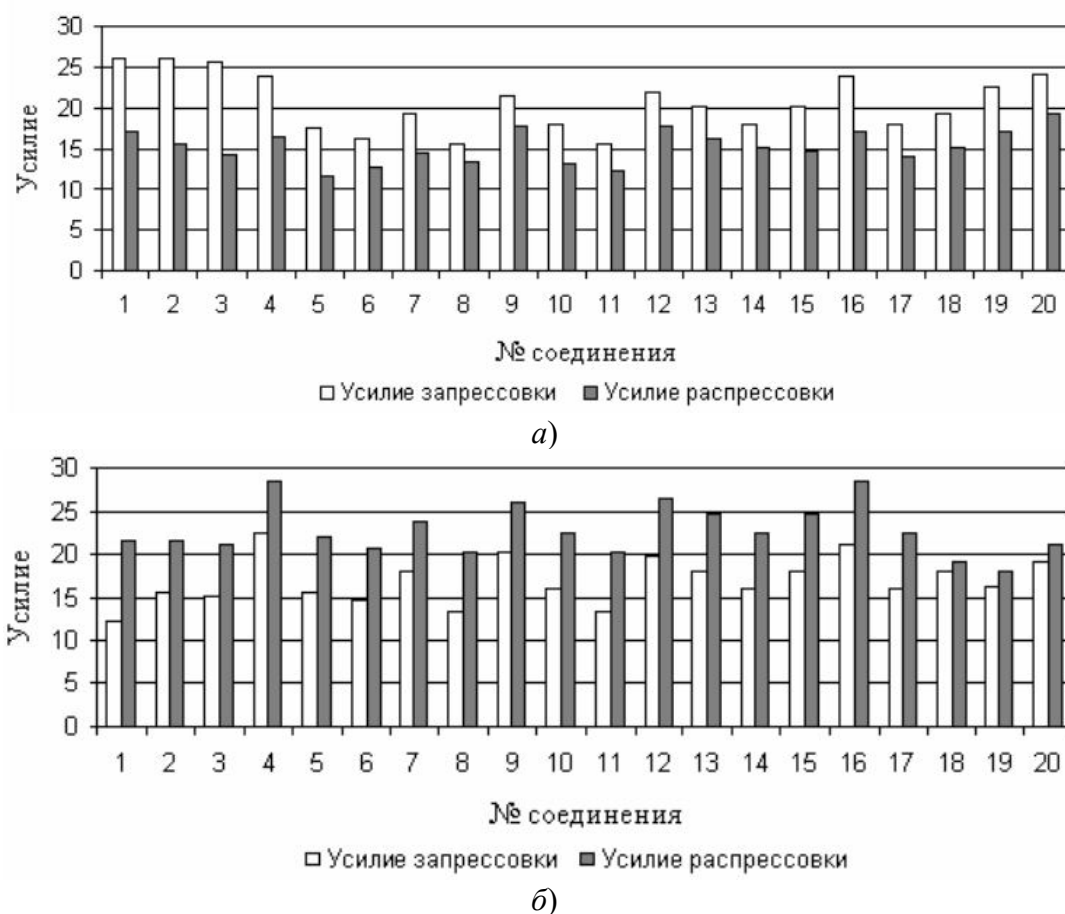


Рис. 7. Величина усилия запрессовки и распрессовки:  
а – без ультразвука; б – с ультразвуком

Применение высокочастотных колебаний приводит к снижению усилия сборки до 20 % при одновременном возрастании прочности соединения до 5,0 %. При этом усилия сборки при ультразвуке меньше, чем при разборке соединения.

Исследования [13] посвящены получению посадок с натягом 10...20 мкм валов и втулок диаметром 25 мм при длине соединения 20 мм. Для получения соединения применялась стержневая пьезокерамическая колебательная система с амплитудой колебаний до 15 мкм. Соединяемым деталям сообщалось статическое усилие 3000 Н, которое создавалось гидропрессом. Время сборки составляло 2,0 с. В данной работе больше описывается процесс контроля параметров процесса сборки, поэтому дополнительных данных не представлено.

Отличительной особенностью работы [14] от других является то, что рассматривается процесс запрессовки без сообщения дополнительного статического усилия. В качестве образцов использовались пары иглы и корпуса распылителя форсунки двигателя КАМАЗ-740 (материал 18Х2Н4МА), разбитые на группы для получения различных величин натяга. В процессе проведения эксперимента, собираемые детали устанавливались на подпружиненное основание и поджимались торцом концентратора трёхполуволновой магнитострикционной колебательной системы. Влияние ультразвука на силу трения оценивалось по глубине запрессовки при различных амплитудах колебаний. Сравнивались расчётные значения, учитывающие только механическую составляющую ультразвукового воздействия при ударе излучателя о вал, и экспериментальные значения (рис. 8).

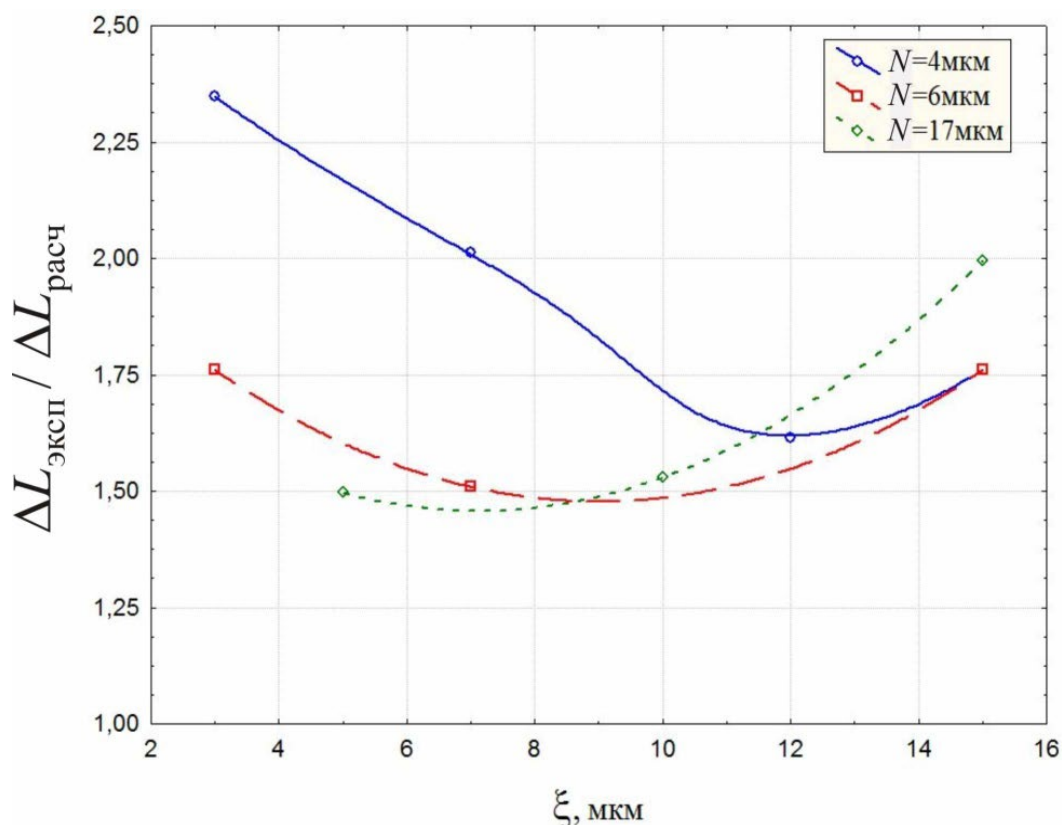


Рис. 8. Зависимость глубины запрессовки от режима ультразвуковой обработки для соединений с натягом 4,6 и 17 мкм

Экспериментальная глубина запрессовки с ультразвуком в 1,5 – 2,5 раза больше, что показывает аналогичное уменьшение силы трения. При этом отмечено, что при маленьких величинах натяга эффективны низкоам-

плитудные колебания, а при увеличении натяга больший эффект возникает при высокоамплитудных режимах обработки.

Процесс получения неразъёмного соединения металлических и пластиковых

деталей рассмотрен в [15]. К запрессовываемой металлической детали подводились ультразвуковые колебания, и прикладывалось статическое усилие (рис. 9).

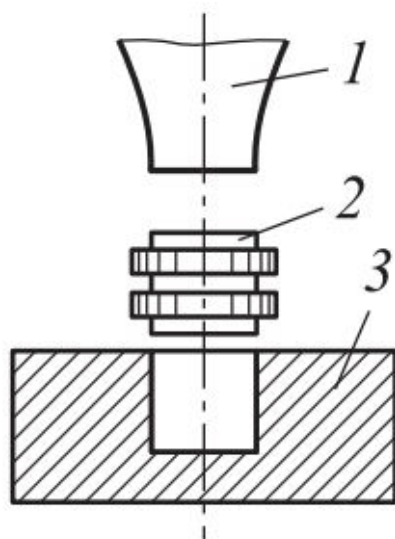


Рис. 9. Схема запрессовки металлической детали в пластиковую:

1 – ультразвуковой концентратор; 2 – металлическая деталь; 3 – пластиковая деталь

Под действием ультразвуковых колебаний в зоне контакта деталей выделяется тепло, что приводит к размягчению термопласта. Форма запрессовываемой детали подобрана так, чтобы после ведущей части, имеющей диаметр больше отверстия, была полость для затекания избыточного пластифицированного материала. После затвердевания и усадки пластмассы металлическая деталь прочно закрепляется в ней.

### Заключение

Использование ультразвуковых колебаний эффективно для снижения трения при получении прессовых соединений.

Эффект снижения трения основан на двух механизмах, к которым относится переход к эффективному трению при высокочастотных колебаниях, и создание смазочного слоя при разрушении микронеровностей трущихся поверхностей.

Анализ результатов работ, посвящённых данной теме, показал значительное снижение силы трения для металлических и неметаллических деталей.

Несмотря на положительный эффект от применения ультразвуковых технологий данное направление не получило широкого распространения и нуждается в проведении дополнительных исследований.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эрдеди А.А. Техническая механика. Детали машин // М.: Издательство «Высшая школа» 1991. 272с.
2. Орлов П.Н. Краткий справочник металлста – 3-е изд., перераб. и доп./ под ред. Орлова П.Н., Скороходова Е.А. // М.: «Машиностроение», 1987. 960 с.
3. Приходько В.М. Ультразвуковая разборка // М.: Издательство МГАДИ (ТУ), 1995. 94 с.
4. Фатюхин Д. С., Нигметзянов Р. И., Сундуков С. К. Технологический процесс получения заклёпочно-го соединения с помощью ультразвукового ударного воздействия // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2019. № 6 (96). С. 17–21.
5. Приходько В.М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте автотракторной техники // М.: Издательство «Техполиграфцентр», 2003. 253 с.
6. Kumar V. C., Hutchings I. M. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration // Tribology International. 2004. Vol. 37. Iss. 10. P. 833–840.
7. Teidelt E., Starcevic J., Popov V. L. Influence of ultrasonic oscillation on static and sliding friction //Tribology Letters. 2012. Vol. 48. P. 51–62.
8. Popov V. L., Starcevic J., Filippov A. E. Influence of ultrasonic in-plane oscillations on static and sliding friction and intrinsic length scale of dry friction processes //Tribology letters. 2010. Vol. 39. P. 25–30.
9. Storck H. et al. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to traveling wave ultrasonic motors // Ultrasonics. 2002. Vol. 40. №1–8. P. 379–383.
10. Николаев В.А., Папшева Н.Д., Штриков Б.Л. Способ сборки прессовых соединений типа вал-втулка. Патент № SU 1764921 A1, опубл. 30.09.1992.
11. Николаев В.А., Штриков Б.Л., Куликов М.А. Способ соединения с натягом деталей типа вал – втулка. Патент № SU 1556858 A1, опубл. 15.04.1990.
12. Батищева О.М., Шуваев В.Г., Папшев В.А., Анкудинов Д.В. Методика и результаты экспериментальных исследований процесса ультразвуковой запрессовки зубков шарошечных долот с использованием автоматизированной системы научных исследований // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. №1-2. С. 415–417.
13. Шуваев В.Г. Диагностика прессовых соединений при ультразвуковой сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. №1. С. 4–7.
14. Сундуков С.К. Совершенствование технологии получения неразъёмных соединений за счёт использования ультразвука // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. № 1. С. 7–13.

15. Волков С.С., Розанов Д.С., Станкевич И.В. Разработка и исследование основных особенностей соединения пластмасс с металлами // Известия вузов. Машиностроение. 2020. № 3 (720). С. 15–22.

## REFERENCES

1. Erdedi A.A. Engineering mechanics. Machine parts// Moscow: Publishing House «Higher School» 1991, 272 p. (in Russian)

2. Orlov P.N. A quick reference metal worker – 3rd ed., updated and revised/ ed. Orlova P.N., Skorokhodova E.A. // Moscow: "Mashinostroenie", 1987, 960 p. (in Russian).

3. Prihodko V.M. Ultrasonic disassembly // Moscow: Publishing House MADI (TU), 1995, 94 p. (in Russian).

4. Fatyukhin R. I., Nigmatzyanov S. K., Sundukov S.K. Engineering process of manufacturing riveted joint using ultrasonic percussive impact / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2019, no. 6 (96), pp. 17–21.

5. Prihod'ko V.M. Ultrasonic technologies in the production, operation and repair of transport equipment. Moscow: Tekhpolygoncentr, 2003, 253 p.

6. Kumar V. C., Hutchings I. M. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration // Tribology International. 2004. Vol. 37. Iss. 10. P. 833–840.

7. Teidelt E., Starcevic J., Popov V. L. Influence of ultrasonic oscillation on static and sliding friction //Tribology Letters. 2012. Vol. 48. P. 51–62.

8. Popov V. L., Starcevic J., Filippov A. E. Influence of ultrasonic in-plane oscillations on static and sliding friction and in-trinsic length scale of dry friction process-es //Tribology letters. 2010. Vol. 39. P. 25–30.

9. Storck H. et al. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors // Ultrasonics. 2002. Vol. 40. №. 1–8. P. 379–383.

10. Nikolaev V.A., Papsheva N.D., Shtrikov B.L. Method of assembling press joints of the shaft-sleeve type. Patent no. SU 1764921 A1, publ. 30.09.1992.

11. Nikolaev V.A., Shtrikov B.L., Kulikov M.A. Pressure coupling of spindle – hob type parts. Patent no. SU 1556858 A1, publ. 15.04.1990.

12. Batishcheva O.M., Shuvaev V.G., Papshev V.A., Ankudinov D.V. Technique and results of experimental researches the process of ultrasonic press fitting dents from cone roll BITS with use of scientific researches automated system / Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2011, no.1–2, pp. 415–417.

13. Shuvaev V.G. Diagnostics of press joints in ultrasonic assembling // Assembly in mechanical engineering, instrument-making. 2007, no. 1. pp. 4–7.

14. Sundukov S.K. Improvement of operational properties of parts permanent joints with ultrasound technologies use/ Assembly in machine-building, instrument-making. 2022, no. 1. pp. 7–13.

15. Volkov S.S., Rozanov D.S., Stankevich I.V. Development and research of the main features of joining plastics and metals / Izvestiya vuzov. Mashinostroenie, 2020, no. 3 (720). pp. 15–22.

Статья поступила в редакцию 14.03.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2023; принята к публикации 30.03.2023

The article was submitted 14.03.2023; approved after reviewing 20.03.2023; assepted for publication 30.03.2023

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

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

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

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

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

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

Сдано в набор 17.05.2023. Выход в свет 30.05.2023.

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