

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**№ 3 (141)**

**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

Чуприков А.О., Ямников А.С. Методология проектирования токарных операций для обработки оболочечных корпусов . . . . . 3

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

Албагачиев А.Ю., Яковлева А.П. Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в наукоёмких технологиях . . . . . 12

Суслов А.Г., Съянов С.Ю. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой . . . . . 19

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

Куксенова Л.И., Алексеева М.С., Козлов Д.А. Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя . . . . . 23

Бреки А.Д. Эмпирический закон кинетики изменения силы трения скольжения при самопроизвольных изменениях состояния фрикционного контакта . . . . . 38

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

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

# SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

**№ 3 (141)**

**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

**Chuprikov A.O., Yamnikov A.S.** Design techniques for turning operations in shell casings processing ..... 3

### TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

**Albagachiev A.Yu., Yakovleva A.P.** Application of combined action methods for the surface layer of machine parts in science-intensive technologies. .... 12

**Suslov A.G., S'yanov S.Yu.** Single-stage engineering support of wear resistance of machine parts by EDM process ..... 19

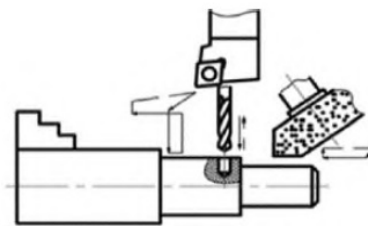
### SURFACE LAYER QUALITY, CONTACT INTERACTION, FRICTION AND WEAR OF MACHINE PARTS

**Kuksenova L.I., Alekseeva M.S., Kozlov D.A.** Dependence of indicators of nitrated steels operational properties on the surface layer structural condition ..... 23

**Breki A.D.** Empirical kinetic law of force variation in the sliding frictional force during spontaneous changes in the state of friction contact ..... 38

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»**



Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. №3 (141). С. 3-11.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 3-11.

Научная статья  
УДК 621.941.1; 621.941-229.3; 62-465  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

## Методология проектирования токарных операций для обработки оболочечных корпусов

Артём Олегович Чуприков<sup>1</sup>, к.т.н.,  
Александр Сергеевич Ямников<sup>2</sup>, д.т.н.

<sup>1</sup> Императорский Тульский оружейный завод, г. Тула, Россия

<sup>2</sup> Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

<sup>1</sup> artemline@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> yamnikovas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9052-9666>

**Аннотация.** Рассмотрена методика проектирования токарных операций для обработки оболочечных корпусов. Предложена структурно-функциональная схема методики оптимизации технологических условий механической обработки оболочечных корпусов и концептуальная модель работы алгоритма, которые могут быть реализованы, в том числе, с использованием современных цифровых технологий.

**Ключевые слова:** классификатор, алгоритм, оболочечные корпуса, силы закрепления, обработка резанием, деформации, режимы резания

**Для цитирования:** Чуприков А.О., Ямников А.С. Методология проектирования токарных операций для обработки оболочечных корпусов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 3 (141). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

## Design techniques for turning operations in shell casings processing

Artem O. Chuprikov<sup>1</sup>, Ph.D. Eng.,  
Alexander S. Yamnikov<sup>2</sup>, D. Eng.

<sup>1</sup> Imperial Tula Arms Factory, Tula, Russia

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

<sup>1</sup> artemline@rambler.ru, <sup>2</sup> yamnikovas@mail.ru

**Abstract.** Designing techniques in turning operations for shell casings processing, is viewed. A structural and functional scheme of improvement practices for the technological conditions of shell casings mechanical processing and a conceptual model of the algorithm that can be implemented, including and specifically through modern digital technologies, are proposed.

**Keywords:** classifier, algorithm, shell casings, fastening forces, cutting processing, deformations, cutting modes

**For citation:** Chuprikov A.O., Yamnikov A.S. Design techniques for turning operations in shell casings processing. / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 3 (141). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

В последнее время расширяется применение оболочечных корпусов, например, для малогабаритных летательных аппаратов. Для

эффективности функционирования оболочечные корпуса малогабаритных летательных аппаратов должны выдерживать высокое внут-

ренное давление и иметь небольшую массу. Такое сочетание требований достигают за счет минимизации толщины стенок при одновременном повышении прочности материала, для чего используют высокопрочные стали и легкие сплавы.

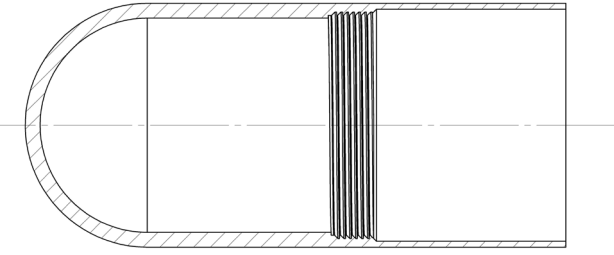
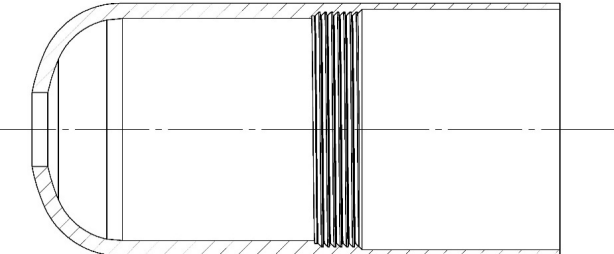
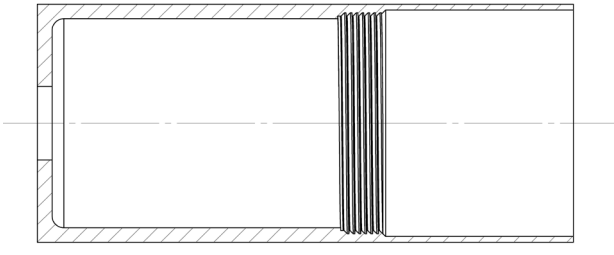

Обычно к оболочечным корпусам предъявляют высокие требования по точности размеров и геометрической формы, качеству поверхности и механическим свойствам, поэтому возникает необходимость применения рациональных методов их изготовления. При этом приходится учитывать принцип построения технологического процесса, основанный на выборе вида рабочих частей приспособлений и режущего инструмента, а также силовое

воздействие на заготовку в процессе ее формообразования.

Формально, по геометрическому признаку – по форме в соответствии с основными конструктивными понятиями, корпуса малогабаритных летательных аппаратов можно отнести по А.П. Соколовскому к классу «1.2 Втулки». Данный класс характеризуется наличием отверстия. Детали этого класса получают наименование: втулки, буксы, вкладыши, гильзы и т. п.»

Тонкостенные оболочки определяются в технической теории оболочек зависимостью:  $h/a \leq 1/20$ , где  $a$  – средний радиус детали;  $h$  – толщина стенки детали. Примеры некоторых оболочечных корпусов приведены в табл. 1.

### 1. Примеры оболочечных корпусов

№ п/п	Тип	Вид
1.	стакан со сферическим дном	
2.	стакан с криволинейным дном с отверстием	
3.	стакан с плоским дном с отверстием	
4.	Труба	

Оболочечные корпуса представляют сочетание цилиндрических или конических поверхностей с плоским или сферическим дном, что видно из табл. 1.

Появление нового вида изделий – оболочек привело к созданию в механике математического аппарата для изучения их особенностей, среди которых выделяется низкая жесткость стенки при большой жесткости оболочки как геометрического тела большого диаметра. Однако для применения этого математического аппарата при разработке технологических операций механической обработки требуется адаптация к конкретным условиям приложения нагрузки от сил и моментов резания и закрепления.

В работе [1] авторами предложен алгоритм расчета режимов резания при токарной обработке оболочечных корпусов, где рекомендуется рассчитывать силы и скорость резания по справочнику технолога-машиностроителя [2], а затем, с помощью программного комплекса ANSYS, рассчитывать получающиеся при выбранной схеме установки упругие деформации заготовки. Если деформации больше

допустимых, тогда авторы предлагают итерационно снижать силу резания путем «смягчения» режима за счет увеличения количества рабочих ходов, т. е. за счет снижения производительности.

В методике, которая представлена в статье [1], количество проведения вычислительных циклов находится из составленной таблицы, состоящей из компоновки стандартное / специальное приспособление и стандартные / специальные режимы резания. Исходя из этого, подбирается количество проведенных циклов.

В существующих методиках подбора параметров механической обработки не учитывается возможность изменения условий приложения нагрузки от сил и моментов резания и закрепления путем применения специально разработанных приспособлений, снижающих упругие деформации заготовок. В этой связи предложена «Методика оптимизации технологических условий механической обработки на токарном станке оболочечных корпусов», структурно-функциональная схема которой приведена на рис. 1.

### Методика выбора параметров механической обработки на токарном станке баллонов высокого давления

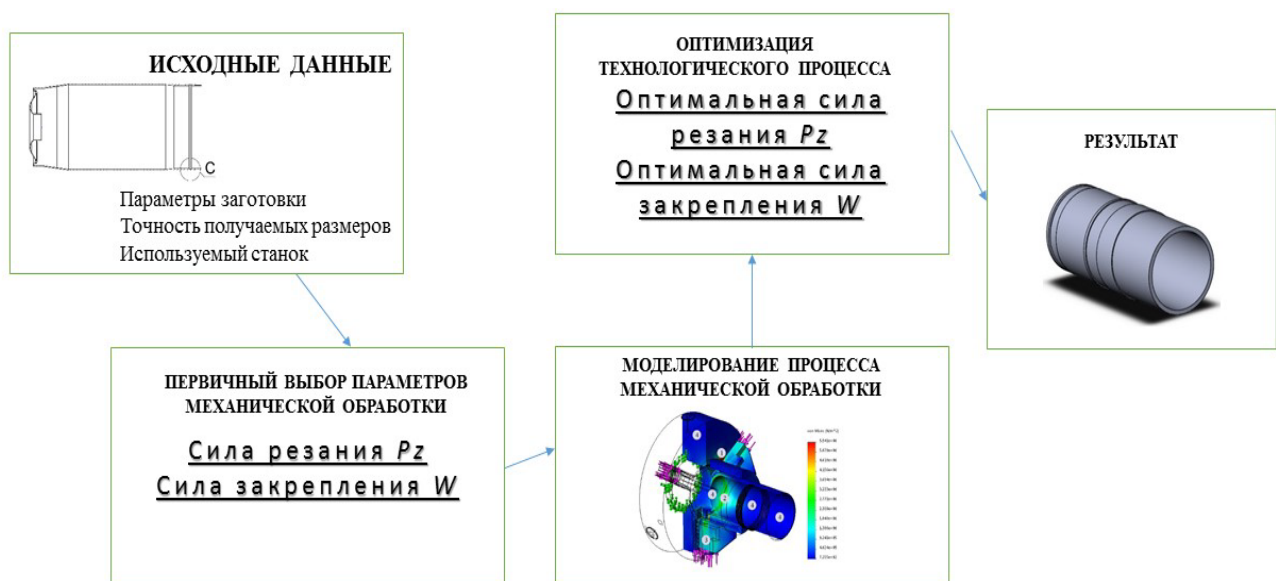


Рис. 1. Структурно-функциональная схема оптимизации условий механической обработки оболочечных корпусов

Методика основана на расчетно-моделируемых принципах выбора параметров обработки. Вначале составляется техническое задание, предметом которого является один из видов оболочечных корпусов. Перед построением маршрутного технологического процесса оценивается класс изделия и применяемых материалов. Исходя из этого, следует придерживаться рекомендаций по выбору вида механической обработки.

После этого необходимо, используя выбранные параметры обработки на токарном станке оболочечного корпуса, произвести расчеты и компьютерное моделирование. Далее, по результатам оценивают образующиеся погрешности и делают корректировки, например, уменьшают силу закрепления при уменьшении силы резания на основе увеличения числа рабочих ходов или уменьшения снимаемого припуска.

Сущность машинного метода заключается в использовании специальных программ компьютерного моделирования, таких как SolidWorks. Методика направлена на использование режимов резания, обеспечивающих минимальную силу закрепления заготовки и, как следствие, минимизацию погрешности формы в поперечном и продольном сечении, которые позволяют повысить качество обрабатываемых деталей вследствие уменьшения упругих деформаций в обработанной детали после раскрепления из патрона станка.

На процессы механической обработки заготовки оболочечного корпуса налагается ряд ограничений, например, по критериям: подача; скорость резания; стойкость инструмента.

В предлагаемой методике добавлен критерий, который будет налагать ограничения на величину погрешности формы продольного и поперечного сечения при закреплении в патроне станка заготовки оболочечного корпуса. Критерий будет основываться на сравнении результатов компьютерного моделирования с требованиями чертежа обрабатываемых заготовок оболочечных корпусов. Рассматривают параметры:

1) напряжения – величина напряжений не должна превышать предел упругости материала, из которого изготовлена заготовка оболочечного корпуса;

2) перемещения – величина перемещений не должна превысить поле допуска на соответствующие размеры.

Оптимизация режимов резания направлена на уменьшение силы резания, что в свою очередь влечет минимизацию сил закрепления. Для достижения цели необходимо использовать алгоритм оптимизационного поиска величин сил закрепления и сил резания. Концептуальная модель работы предлагаемого алгоритма представлена на рис. 2.

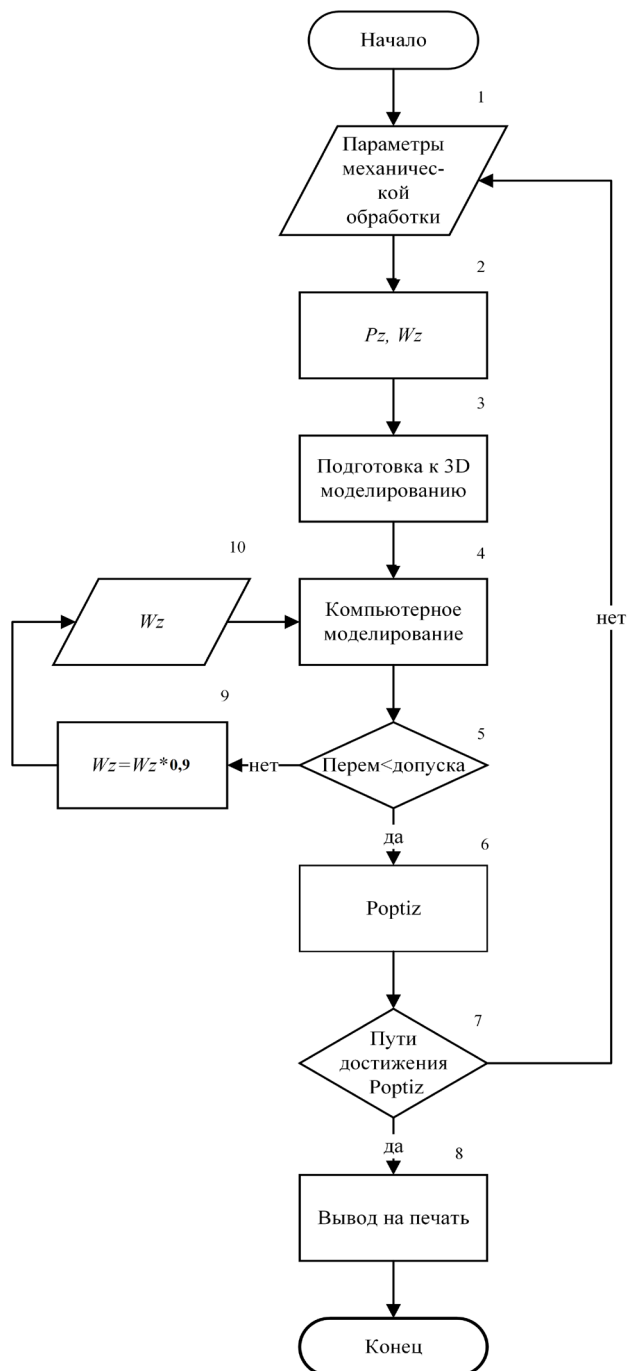


Рис. 2. Концептуальная модель работы алгоритма

В блоке 1 «Параметры механической обработки» производят ввод исходных данных. Он включает в себя следующие составляющие:

1. Марку обрабатываемой заготовки оболочечного корпуса;
2. Вид проводимой технологической операции;
3. Глубину срезаемого слоя;
4. Материал режущего инструмента;
5. Мощность используемого станка;
6. Схему базирования заготовки оболочечного корпуса при механической обработке;
7. Конструктивную схему приспособления.

Далее в блоке 2 процесса « $Pz$ ,  $Wz$ » производят расчет силы резания и закрепления заготовки в патроне станка по исходным данным с учетом известных формул.

В блоке 3 процесса «Подготовка к 3D моделированию» выполняют действия в трехмерной программной среде Solidworks:

1. Составление 3D модели заготовки оболочечного корпуса.
2. Составление 3D модели приспособления.
3. Создание сборки с участием 3D моделей заготовки оболочечного корпуса и приспособления.
4. Определение области перемещения движущихся частей приспособления.
5. Определение контактных площадок 3D моделей заготовки оболочечного корпуса и приспособления.
6. Приложение силы закрепления к подвижным частям приспособления, которые фиксируют заготовку оболочечного корпуса.
7. Создание 3D сетки в компьютерной среде 3D моделирования.

Затем следует блок 4 «Компьютерное моделирование». В нем осуществляется проведение процесса компьютерного моделирования с учетом всех исходных данных. В ходе компьютерного моделирования определяют напряжения и величины перемещений.

Последующий блок 5, это цикл решения «Перем<допуска». При соблюдении условия не превышения рассчитанных в предыдущем блоке величин перемещений по отношению к допускам на размеры оболочечного корпуса, осуществляется переход к следующему блоку

6 процесса «Portiz», где рассчитывают оптимальную силу резания, как функцию от оптимальной силы закрепления заготовки оболочечного корпуса в патроне станка.

Если не соблюдаются вышеуказанные условия, то цикл направляют на блок 9 процесса « $Wz = Wz*0,9$ », где с шагом 10 % уменьшают силу закрепления, и последующий блок 10 данных « $Wz$ » вводит ее в исходные данные для компьютерного моделирования в блоке 4 процесса «Компьютерное моделирование».

После расчета оптимальной силы резания в блоке 6 процесса «Portiz» анализируют пути достижения оптимальной силы резания в процессе механической обработки. В блоке 7 цикла решения «Пути достижения Portiz», если получен результат «Да», то выявляют такие пути, например, снижением частоты вращения шпинделя, подачи суппорта, глубины срезаемого слоя, изменения метода нарезания резьбы, что фиксируют в блоке 8 вывода данных «Вывод на печать». После чего алгоритм заканчивается блоком «Конец».

Если по блоку 7 «Пути достижения Portiz» получен результат «нет», то производят возврат к первоначальному блоку 1 «Параметры механической обработки». Анализируют возможность глобальной корректировки процесса механической обработки для выполнения условия моделирования или выявления случая, где при выбранных условиях процесс обработки требует смены выбранного оборудования или даже типа технологической операции [3].

Отличие от методики, приведенной в статье [1], состоит в том, что в компьютерном моделировании моделируется не только закрепляемая заготовка, но и приспособление [4]. Создается «сборка» из приспособления и заготовки оболочечного корпуса, в котором также определяют подвижные части приспособления, фиксирующие заготовку оболочечного корпуса, и к ним в компьютерном моделировании прикладывают силы закрепления. В таком случае рассматривают влияние диаметра расточки кулачков патрона на заготовку оболочечного корпуса [5].

Также в представленной методике в случае невыполнения условия «Перем<допуска» производят последующий шаг: уменьшение

силы закрепления на выбранный эмпирический коэффициент 0,9...0,95, т. е. если в ходе проведенного моделирования выявилось, что критерии не соответствуют требуемым значениям, то проводят оптимизационный поиск величины силы закрепления. Необходимо с шагом 5 % уменьшать силу закрепления и заново проводить моделирование, и так далее 10 %, 15 %, 20 %, 25 %... Цикл повторяется до выполнения условия «Перем<допуска».

В момент, когда критерии станут соответствовать требуемым значениям, моделирование приостанавливается. Полученную силу закрепления принимают за основу обратного расчета, по которой рассчитывается оптимальная сила резания. Затем ищут пути достижения оптимальной силы резания и, в случае их отсутствия, производят возврат к началу.

Вышеуказанный машинный метод берет за свою основу расчеты деформационных погрешностей, возникающих при закреплении заготовки оболочечного корпуса. Авторами с использованием разработанных В.С. Корсаковым теоретических основ проектирования приспособлений были спроектированы специальные приспособления для закрепления нежестких оболочечных корпусов:

1. Патрон для закрепления длинномерных нежестких тонкостенных заготовок (Пат. 143098 РФ, МПК В23В 31/10).

2. Патрон для закрепления нежестких заготовок (Пат. 147617 РФ, МПК В23В 31/10.).

3. Цанговый токарный патрон (Пат. 2524518 РФ, МПК В23В 31/20 В23G 1/00).

4. Патрон для закрепления длинномерных нежестких тонкостенных заготовок (Пат. 143098 РФ, МПК В23В 31/10).

5. Оправка для закрепления тонкостенных цилиндрических заготовок (Патент RU 2688019, В23В31/40).

6. Способ нарезания резьбы и разжимная цанга (Пат. 2521567 РФ, МПК В23G1/02).

Эти разработки позволяют учитывать влияние упругих деформаций оболочечных корпусов при закреплении в станочных приспособлениях и уменьшать упругие деформации обрабатываемых поверхностей на порядок.

Например, если требуется уменьшить деформационные погрешности в стенках оболочечного корпуса типа 1 (см. табл. 1), то целесообразно создать встречное равномерно распределенное, созданное под всей периферией зажимного пояса усилие, препятствующее деформированию стенок оболочечного корпуса.

Для уменьшения упругих деформаций оболочечного корпуса разработана цанга, которую помещают в полость корпуса. В результате этого, при закреплении в зоне сжатия стенки, показанной стрелками, формируются встречные силы (рис. 3)

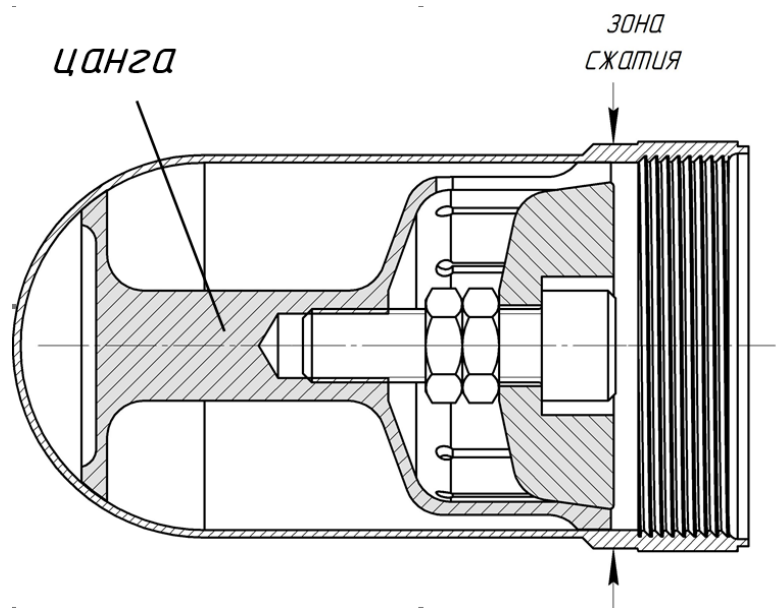


Рис. 3. Схема установки разжимной цанги в оболочечном корпусе



Разжимная цанга выполнена в виде разрезной чаши (рис. 4), лепестки которой отогнуты вовне, образуя с обратной стороны лепестка конический участок поверхности. Концы лепестков снабжены контактными площадками. В полость чаши помещен конус, поверхность которого сопряжена с коническими

участками лепестков чаши. В центре конуса выполнено сквозное отверстие, в котором размещен винт, ввинчивающийся в выполненное в ножке чаши, глухое резьбовое отверстие, а основание ножки снабжено кольцевым скосом, сопрягающимся с дном корпуса.



Рис. 4. Внешний вид разжимной цанги

Лепестки цанги можно, по аналогии с Патентом RU 2688019, покрыть упругопластичным материалом, например резиной или полипропиленом, обладающими повышенными диссипативными свойствами. В этом случае шероховатость обработанных поверхно-

стей уменьшается в 1,5 – 2 раза [6]. Растачивание внутреннего диаметра корпуса и нарезание внутренней упорной резьбы производят, закрепляя заготовку в трех кулачковом патроне (Пат. 147617 РФ) со специальными охватывающими секторами (рис. 5).

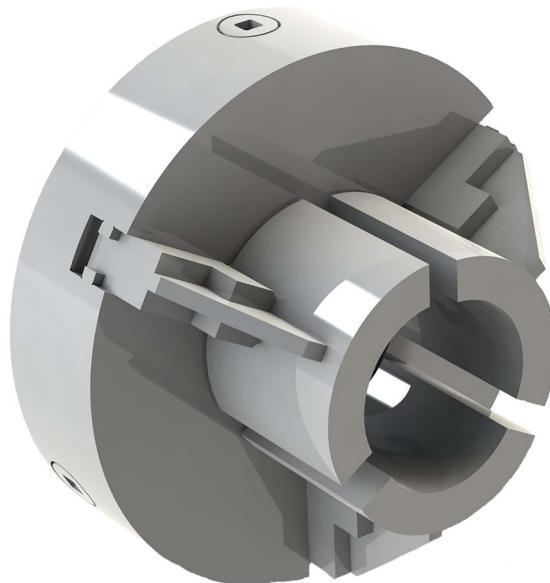


Рис. 5. Конструкция патрона для зажима оболочечного корпуса

Наличие охватывающих секторов позволяет уменьшить величину неизбежной грани в поперечном сечении оболочечного корпуса и позволяет отказаться от более трудоемких цанговых патронов, что повышает универсальность зажимного приспособления. Использование охватывающих кулачков вызывает контакт с поверхностью закрепляемой заготовки либо по трем точкам, либо по шести в зависимости от радиуса кривизны заготовки и конструкции кулачка.

Совместное применение представленных примеров конструкторско-технологических разработок в совокупности с разработанной методологией проектирования токарных операций для обработки оболочечных корпусов снижает максимальные перемещения стенок до 0,00508...0,00542 мм.

### Выводы

1. Недопустимо большое деформирование заготовки под действием сил закрепления – является фактором, ограничивающим производительность механической обработки оболочечных корпусов.

2. Величина оптимальной силы закрепления заготовки в приспособлении прямо пропорциональна силам резания, достижение оптимальных значений которых находятся расчётноаналитическим путем.

3. Недостатком известных алгоритмов поиска оптимальных значений сил резания является только уменьшение этих сил путем снижения режимов резания, а, следовательно, и производительности.

4. Предложенные в статье структурно-функциональная схема методики оптимизации условий механической обработки оболочечных корпусов и концептуальная модель работы алгоритма могут быть реализованы с использованием современных цифровых технологий.

5. Одним из перспективных инструментов для оперативного определения ожидаемого поведения тонкостенных деталей является вычислительная программная система SolidWorks.

6. Методология проектирования токарных операций для обработки оболочечных

корпусов расширяет возможности технолога в выборе способа их изготовления, особенно в сочетании со специализированными конструкциями технологической оснастки.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гаврюшин С.С., Жаргалова А.Д., Лазаренко Г.П., Семисалов В.И. Метод определения условий механической обработки тонкостенных деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 11 (668). С. 53–61.

2. Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилов А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2. М.: Машиностроение-1, 2001. 944 с.

3. Ямников А.С., Ямникова О.А., Чуприков А.О., Матвеев И.А. Упругие деформации заготовок полых осесимметричных корпусов при закреплении в трехкулачковых патронах // Черные металлы. 2018. № 6 (1038). С. 25–30.

4. Ямников А.С., Чуприков А.О. Токарные патроны для закрепления тонкостенных заготовок // Вестник машиностроения. 2015. № 8. С. 64–66.

5. Чуприков А.О., Ямников А.С. Моделирование погрешностей закрепления тонкостенных сварных корпусов в трехкулачковых патронах // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 8. С. 18–22.

6. Ямников А.С., Богомолов М.Н. Центрирующая оправка повышенной виброустойчивости для фрезерования тонкостенных втулок // Черные металлы. 2019. № 5. С. 52–57.

### REFERENCES

1. Gavryushin S.S., Zhargalova A.D., Lazarenko G.P., Semisalov V.I. Method of determining the conditions for machining thin-walled parts. News of higher educational institutions. Mechanical engineering, 2015, no. 11 (668), pp. 53–61.

2. Dalsky A.M., Suslov A.G., Kosilov A.G., Meshcheryakov R.K. Spravochnik tehnologa-mashinostroitel'ya [A guide for industrial mechanic engineer] in 2 vol., vol. 2. Moscow, Mashinostroenie-1, 2001, 944 p. (in Russian).

3. Yamnikov A.S., Yamnikova O.A., Chuprikov A.O., Matveev I.A. Elastic deformations of workpieces of hollow axisymmetric bodies when fastened in three-jaw chucks. Ferrous metals, Moscow, 2018, no. 6 (1038), pp. 25–30.

4. Yamnikov A.S., Chuprikov A.O. Chucks for thin-walled blanks. Bulletin of Mechanical Engineering, 2015, no. 8, pp. 64–66.

5. Chuprikov A.O., Yamnikov A.S. Modeling of errors in fixing thin-walled welded bodies in three-jaw chucks. Science-intensive technologies in mechanical engineering, Moscow, 2014, pp. 18–22.

6. Yamnikov A.S., Bogomolov M.N. Tsentriruyushchaya opravka povyshennoy vibroustoychivosti dlya frezerovaniya tonkostennykh vtulok [Centering mandrel of increased vibration resistance for milling thin-walled sleeves]. Ferrous metals, 2019, no. 5, pp. 52–57.

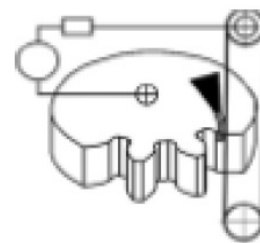
**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 27.01.2023; одобрена после рецензирования 03.02.2023; принята к публикации 08.02.2023.

The article was submitted 27.01.2023; approved after reviewing 03.02.2023; assepted for publication 08.02.2023.





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №3 (141). С.12-18.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 12-18.

Научная статья

УДК 662.24

doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-18

## Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в научноёмких технологиях

Али Юсупович Албагачиев<sup>1</sup>, д.т.н.,

Анна Петровна Яковлева<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> ИМАШ РАН им. А.А. Благодирова, Москва, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup> yakovleva525@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Представлена теоретическая зависимость остаточных напряжений от режимов комбинированной обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала при влиянии фактора наследственности. Адекватность зависимости подтверждена экспериментальным исследованием.

**Ключевые слова:** комбинированная обработка, упрочнение концентрированными потоками энергии, модифицированные поверхности, остаточные напряжения, технологическая наследственность

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность д.т.н., проф. Суслору А.Г., коллективу кафедры «Физические проблемы материаловедения» НИЯУ МИФИ и лично профессору Исаенковой М.Г. и аспиранту Минушкину Р.А. за помощь и добрые советы.

**Для цитирования:** Албагачиев А.Ю., Яковлева А.П. Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в научноёмких технологиях // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 3 (141). С.12–18. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-18

## Application of combined action methods for the surface layer of machine parts in science-intensive technologies

Ali Yu. Albagachiev<sup>1</sup>, D. Eng.,

Anna P. Yakovleva<sup>2</sup>, Ph.D. Eng.

<sup>1</sup> IMS RAS named after A.A. Blagodarov, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> yakovleva525@mail.ru

**Abstract:** Residual potential theoretical dependence upon the modes of combined machining operations and physical and mechanical properties of the processed material under the influence of the inheritance factor is presented. Experimental evidence of dependence sufficiency is given.

**Keywords:** combined machining operation, hardening by concentrated flow of energy, mod-ified surfaces, residual potential, technological heredity

**Acknowledgments:** The authors acknowledge help of the Doctor of Technical Sciences, Professor Suslov A.G., the head of the Department of "Physical Problems of Materials Science" of the NNRU MPhI, enclose gratitude for Professor Isaenkova M.G. personally and graduate student Minushkin R.A. for their assistance and sound advice.

*For citation:* Albagachiev A.Yu., Yakovleva A.P. Application of combined action methods for the surface layer of machine parts in science-intensive technologies. / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 3 (141). P. 12–18. doi:

Основным направлением исследований в области наукоемких технологий стало проектирование и создание комбинированных методов обработки. Анализ известных физических воздействий и их разновидностей дает основания утверждать, что при различных сочетаниях имеющихся способов можно спроектировать большое количество новых техпроцессов, имеющих высокие эксплуатационные показатели. Это направление следует рассматривать как новый этап развития технологии обработки [1 – 4].

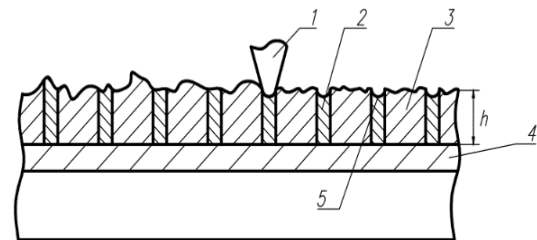
В настоящее время внимание специалистов уделяется методам обработки концентрированными потоками энергии. Эффективность этих методов доказана в трудах большого количества ученых [1, 3 – 6]. Большой вклад в развитие этого направления внесли Суслов А.Г., Горленко А.О., Григорьянц А.Г., Смоленцев В.П., Федоров В.П. и др. Методы обработки концентрированными потоками энергии изучены достаточно подробно. Однако сочетание с другими методами, на пример, поверхностной пластической деформацией (ППД), изучен недостаточно. Не исследовано влияние методов и режимов обработки на состояние поверхностного слоя, в том числе наследственное влияние режимов обработки на остаточные напряжения в поверхностном слое.

Поэтому данная статья посвящена исследованию остаточных напряжений и их распределению в поверхностном слое после упрочнения концентрированными потоками энергии и ППД.

Для решения поставленной задачи авторами был разработан метод комбинированной обработки (КО), который заключается в последовательном выполнении упрочнения одним из методов обработки концентрированными потоками энергии (на пример – лазерной закалкой или электрохимической обработкой) и методом ППД (на пример – алмазным выглаживанием) [7 – 9].

Теоретическими предпосылками для разработки представленного метода является анализ достоинств и недостатков методов упрочнения концентрированными потоками энергии. Особенностью этих методов является

наличие зон отпуска. В этих зонах наблюдается некоторое понижение твердости (рис. 1) [6]. Методы ППД благоприятно воздействуют на поверхностный слой, особенно после термического воздействия [7 – 9]. Поэтому было выдвинуто предположение, что наложение слоев позволит создать в поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения. Моделирование процесса КО представлено на рис. 1.



**Рис. 1. Моделирование процесса КО**

1 – алмазный выглаживатель; 2 – зоны отпуска; 3 – упрочненный слой; 4 – основной металл; 5 – винтовые канавки после алмазного выглаживания;  $h$  – глубина упрочнения

После обработки концентрированными потоками энергии в поверхностном слое образуется упрочненный слой с незначительными сжимающими остаточными напряжениями. Алмазный выглаживатель проходя по поверхности образует новый слой и за счет увеличения плотности дислокаций может многократно увеличить значение сжимающих остаточных напряжений, а попадая в зону отпуска образует винтовые канавки. Так же необходимо учитывать и наследственное влияние режимов обработки на величину и знак остаточных напряжений.

В работе представлена теоретическая зависимость остаточных напряжений от режимов и физико-механических свойств материала. Авторы определяли напряжения первого рода, как наиболее значимые с точки зрения промышленного применения. Остаточные напряжения определяли для двух вариантов комбинированной обработки: первый вариант – ЭМО и алмазное выглаживание; второй вариант – лазерная закалка и алмазное выглаживание.

Остаточные напряжения будут складываться из нескольких составляющих:

температурная – на которую будет оказывать влияние режимы обработки концентрированными потоками энергии; структурно-фазовая – составляющая, которая будет зависеть от физико-механических свойств материала на всех этапах обработки; механическая – на которую будет оказывать влияние режимы алмазного выглаживания.

При теоретическом исследовании влияния режимов комбинированной обработки на величину и характер остаточных напряжений в поверхностном слое использовали зависимость:

$$\sigma_{ост} = \sigma_{темп} + \sigma_{\phi} + \sigma_{мех}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{темп}$  – температурные остаточные напряжения;  $\sigma_{\phi}$  – структурно-фазовые остаточные

напряжения;  $\sigma_{мех}$  – механические остаточные напряжения.

Для первого варианта комбинированной обработки с применением в качестве упрочняющей обработки ЭМО составляющие формулы (1) будут иметь вид:

$$\sigma_{темп}(z) = \alpha E \Delta\theta(z), \quad (2)$$

где  $z$  – текущая координата, определяющая глубину упрочненного поверхностного слоя;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала детали;  $\Delta\theta(z)$  – максимальная температура на глубине ( $z$ ), поверхностного слоя детали.

Максимальную температуру в зоне упрочнения можно представить:

$$\Delta\theta(z) = \alpha E \frac{(1-\alpha_T)(P_g v_p + N)}{\lambda_1 A \sqrt{\pi}} \left\{ \left(1 - \frac{t}{\Delta t}\right) t \left[ 2\sqrt{at} \cdot e^{\left(-\frac{z^2}{4at}\right)} - \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right] - \frac{1}{2a} \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{\Delta t}\right) \cdot \left[ \frac{(2\sqrt{at})^3 e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)}}{3} - \frac{4z^2 e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} \sqrt{at}}{3} + \frac{2}{3} z^3 \cdot \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right] - \frac{1}{80a^2 \Delta t} \left[ (2\sqrt{at})^5 e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} - \frac{2}{3} z^2 (2\sqrt{at})^3 \cdot e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} + \frac{4}{3} z^4 2\sqrt{at} \cdot e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} - \frac{4}{3} z^5 \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right] \right\}. \quad (3)$$

Формула (3) является сложной для расчетов и можно воспользоваться вариантом для приблизительных расчетов:

$$\Delta\theta(z) = \alpha E \frac{2\alpha_T(P_g v_p + IU)}{\lambda_1 A \sqrt{\pi}} \left( \sqrt{at} e^{\left(-\frac{z^2}{4at}\right)} \right), \quad (4)$$

где  $z$  – текущая координата, м;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала детали;  $\alpha_T$  – коэффициент распределения тепловых потоков (коэффициент теплопоглощения Шарона);  $P_g$  – приведенная сила прижима инструмента при комбинированной обработке;  $v_p$  – скорость вращения детали;  $I$  – сила тока;  $U$  – напряжение;  $\lambda_1$  – теплопроводность материала детали;  $A = l \cdot B$ , где  $B$  – ширина упругого контакта ролика по Герцу;  $l$  – длина касания инструмента с обрабатываемой поверхностью (ширина ролика-электрода), м;  $a$  – температуропроводность материала детали, м<sup>2</sup>/с;  $t$  – время контакта, с;  $\operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)$  – значение функции ошибок.

Структурно-фазовые остаточные напряжения  $\sigma_{\phi}$  можно определить по формуле:

$$\sigma_{\phi} = -E \left(1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}}\right), \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости материала;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность материала до и после обработки соответственно.

Механические остаточные напряжения возникают за счет действия на материал детали усилия при алмазном выглаживании:

$$\sigma_{мех}(z) = -\frac{P_g}{\pi} \cdot \left[ \frac{3}{2(r^2 + z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln\left(\frac{z}{2r}\right) - \frac{3}{10r^2} \right], \quad (6)$$

где  $z$  – текущая координата;  $P_g$  – приведенная сила, которая рассчитывается по формуле:

$$P_g = \sum_{i=1}^n P_i,$$

где  $P_i$  – сила прижима электрода-инструмента и алмазного выглаживателя;  $r$  – радиус алмазного выглаживания.

Подставляя (2), (5) и (6) в (1) получим формулу для расчета остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое детали после комбинированной обработки:

$$\sigma_{\text{ост}} = \alpha E \frac{2\alpha_{\tau}(P_g v_p + IU)}{\lambda_1 l_{\text{инс}}^2 \sqrt{\pi}} \left( \sqrt{at} e^{\left(\frac{-z^2}{4at}\right)} \right) - \frac{P_g}{\pi} \cdot \left[ \frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln\left(\frac{z}{2l_{\text{инс}}}\right) - \frac{3}{10r^2} \right] + E \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right). \quad (7)$$

Для второго варианта комбинированной обработки с применением лазерной заковки в

качестве упрочняющей обработки формула (1) будет иметь вид:

$$\sigma_{\text{ост}} = \alpha E \frac{2(1-R)q}{\lambda} - \frac{P_g}{\pi} \cdot \left[ \frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln\left(\frac{z}{2r}\right) - \frac{3}{10r^2} \right] + E \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right), \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{темп}}(z) = \alpha E \Delta\theta(z),$$

$$\Delta\theta(z) = \frac{2(1-R)q}{\lambda} \left( \sqrt{at} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{at}}\right] - \sqrt{a(t-\tau)} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}}\right] \right),$$

где  $R$  – коэффициент отражения материала,  $q$  – плотность мощности лазерного излучения.

Для простоты расчета используем зависимость:

$$\sigma_{\text{темп}}(z) = \alpha E \frac{2(1-R)q}{\lambda}. \quad (9)$$

Структурно-фазовые остаточные напряжения рассчитаем по формуле (5). Механические остаточные напряжения будут зависеть от режимов алмазного выглаживания:

$$\sigma_{\text{мех}}(z) = -\frac{P}{\pi} \cdot \left[ \frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln\left(\frac{z}{2r}\right) - \frac{3}{10r^2} \right], \quad (10)$$

где  $P$  – сила прижима инструмента;  $r$  – радиус алмазного выглаживателя.

Для удобства расчетов была разработана компьютерная программа для вычисления параметра остаточных напряжения по формулам (7, 8) на языке Visual studio 2017 C# [8].

Проверку адекватности полученных теоретических зависимостей (7, 8) проводили на образцах, изготовленных из стали 45,

20Х3МВФ и 40Х (рис. 2) рентгеновским методом оценки, как наиболее точным. Методика исследования подробно изложена в [9]. В работе проведен рентгеноструктурный анализ поверхностных слоев после различных этапов комбинированной обработки – механической обработки, обработки концентрированными потоками энергии и алмазном выглаживании (табл. 1 – 3).

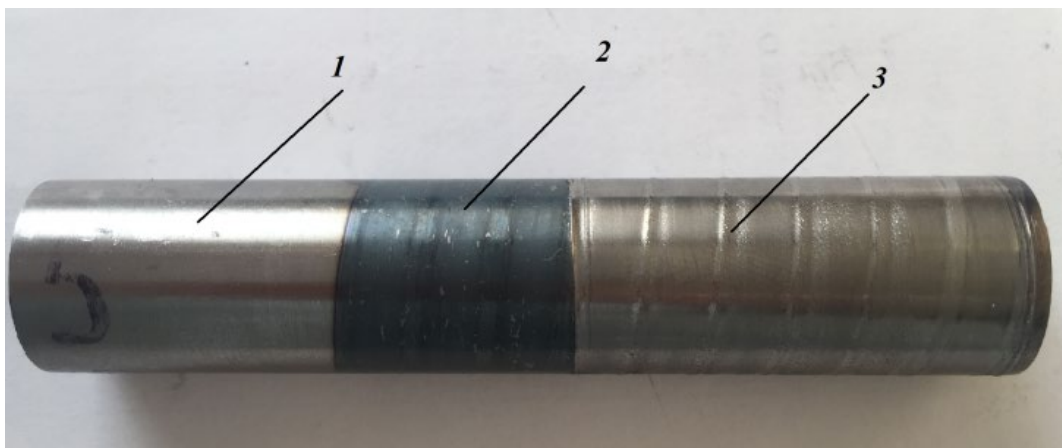


Рис. 2. Образцы для проверки адекватности теоретических зависимостей:

1 – область исследования после механической обработки; 2 – область исследования после обработки концентрированными потоками энергии; 3 – область после алмазного выглаживания

**1. Значения остаточных напряжений, межплоскостных расстояний и полуширины после каждого этапа обработки (сталь 45)**

№ образца	№ точки на образце	Обработка	Напряжения, МПа		a, А	FWHM, град.
			Осевые	Окружные		
1	1	МО	- 504 ± 54	- 524 ± 138	2,8717	1,2322
	2	ЭМО	- 554 ± 15	- 579 ± 406	2,8684	2,3448
	3	АВ	-1235 ± 119	- 1237 ± 293	2,8802	2,2039
	4	МО	- 214 ± 19	- 214 ± 74	2,8721	1,2063
	5	ЭМО	- 567 ± 128	- 436 ± 23	2,8694	1,6070
	6	АВ	- 1258 ± 96	- 1410 ± 31	2,8785	2,2343
3	1	МО	- 424 ± 23	- 230 ± 45	2,8708	1,4541
	2	ЭМО	- 488 ± 81	- 339 ± 238	2,8708	1,7255
	3	АВ	- 1178 ± 37	- 939 ± 176	2,8800	2,2848
	4	ЭМО	- 167 ± 100	- 94 ± 226	2,8697	1,6419
	5	МО	- 164 ± 18	94 ± 161	2,8692	1,4004
	6	АВ	- 1020 ± 300	- 949 ± 47	2,8789	2,2539
	7	ЭМО	- 300 ± 84	- 142 ± 79	2,8691	1,9071
	8	МО	- 287 ± 13	131 ± 123	2,8705	1,4248
5	1	МО	- 348 ± 46	- 405 ± 152	2,8710	1,3638
	2	АВ	- 1142 ± 72	- 1568 ± 354	2,8771	2,9638
	3	АВ	-1 370 ± 20	- 940 ± 173	2,8801	2,3827
	4	ЭМО	- 380 ± 89	191 ± 131	2,8689	1,6080
	5	МО	- 167 ± 26	52 ± 25	2,8698	1,4710

МО – механическая обработка; ЭМО – электрохимическая обработка; АВ – алмазное выглаживание

**2. Значения остаточных напряжений, межплоскостных расстояний и полуширины после каждого этапа обработки (сталь 20Х3МВФ)**

Обработка	Напряжения, МПа		a, А	FWHM, град.
	Осевые	Окружные		
Механическая обработка	- 125 ± 53	- 147 ± 44	2,8682	0,4110
Электрохимическая обработка	- 554 ± 15	- 479 ± 406	2,8684	2,3448
Алмазное выглаживание	- 1235 ± 119	- 1237 ± 293	2,8802	2,2039
Алмазное выглаживание	- 1142 ± 72	- 1568 ± 354	2,8771	2,9638
Электрохимическая обработка	- 180 ± 89	- 191 ± 131	2,8689	1,6080



**3. Значения остаточных напряжений, межплоскостных расстояний и полуширины после каждого этапа обработки (сталь 40X)**

Обработка	Напряжения, МПа		a, А	FWHM, град.
	Осевые	Окружные		
Механическая обработка	- 145 ± 33	52 ± 48	1,9682	0,4220
Электромеханическая обработка	- 572 ± 25	- 521 ± 426	2,8672	2,3548
КО (ЭМО и алмазное выглаживание)	- 1355 ± 121	- 1251 ± 203	2,8892	2,4039
КО (лазерная закалка и алмазное выглаживание)	- 1156 ± 52	- 1488 ± 314	2,8671	2,9634
Лазерная закалка	- 480 ± 89	- 691 ± 131	2,8579	2,6080

Таким образом, было установлено, что высказанное ранее предположение о положительном наследственном влиянии ППД на величину остаточных напряжений в поверхностном слое после комбинированной обработки оказалось верным. Анализ табл. 1 – 3 показал, что после механической обработки в поверхностном слое образуются растягивающие и сжимающие напряжения. После воздействия концентрированными потоками энергии в поверхностном слое происходят процессы наследственности и самоорганизации, которые способствуют образованию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. После алмазного выглаживания происходит деформация кристаллической решетки и увеличиваются плотности дислокаций, а значение сжимающих остаточных напряжений увеличивается в 2 – 3,3 раза. Структура и свойства сердцевины, при этом, не претерпевают каких-либо изменений.

Исследование показало, что комбинированием различных методов можно получать поверхности с новыми свойствами, при КО действует принцип суперпозиции – сочетание методов дает такой эффект, которого нельзя достигнуть каждым методом в отдельности. Это доказано при исследовании остаточных напряжений после каждого этапа обработки.

Следовательно, современный этап развития техники связан с разработкой инновационных технологий, получением поверхностей с

новыми свойствами и использованием комбинированных методов обработки.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. **Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др.** Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общей ред. А.Г. Суслова. М: Машиностроение, 2006. 448 с.
2. **Григорьев С.Н., Смоленцев Е.В., Волосова М.А.** Технология обработки концентрированными потоками энергии. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 220 с.
3. **Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др.** Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под редакцией А.Г. Суслова. 2022. 552 с.
4. **Суслов А.Г.** Комплексные исследования качества поверхностного слоя деталей машин // Технологическое управление качеством поверхности деталей: Сб. науч. тр. Киев, 1998. С. 21–27.
5. **Суслов А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М: Машиностроение, 1987. 208 с.
6. **Grigor'yants A.G., Shiganov I.N.** Development of Domestic Equipment for Laser Additive Technologies by Melting Metallic Powders // Russian Metallurgy (Metally). 2020. 2020(6). P. 649–653
7. **Fedorov S., Albagachiev A., Isaenkova M., Yakovleva A., Zaripov V., Minushkin R.** The effect of combined processing schedules on the value and nature of residual stresses in the surface layer of cylindrical friction pairs // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. electronic edition. 2019. 012032.
8. **Yakovleva A.P., Albagachiev A.Y.** Theoretical Investigation of the Influence of Combined Machining Modes on the Value and Character of Residual Stresses in the Surface Layer of Cylindrical Friction Pairs // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49(3). P. 237–242

9. Yakovleva A., Isaenkova M., Minushkin R. The Effect of Combined Processing on Residual Stresses in the Surface Layer of Power Plant Parts // *Materials*. 2022. Vol. 15(2). 420.

#### REFERENCES

1. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A., et al. Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv detalei i ikh soedinenii [Technological Means of Ensuring Satisfactory Operational Properties of Machine Parts and Joints] under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 448 p. (in Russian).

2. Grigoriev S.N., Smolentsev E.V., Volosova M.A. Tekhnologiya obrabotki kontsentrirovannymi potokami energii [Technology of processing by concentrated streams of energy]. Stary Oskol: TNT, 2009. 220 p. (in Russian).

3. Suslov A. G., Fedorov V. P., Gorlenko O. A. et al. Fundamentals of technological support and reliability improvement of mechanical engineering articles. Edited by A. G. Suslov. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2022. 552 p.

4. Suslov A.G. Kompleksnie issledovaniya kachestva poverhnostnogo sloya detaley [Complex studies of the quality of the surface layer of machine parts. Tehnologicheskoe upravlenie kachestvom poverhnostnogo sloya detalei: Sb. nauch. tr., Kiev, 1998. pp. 21–27. (in Russian).

5. Suslov A.G. Tehnologicheskoe obespechenie parametrov sostoyaniya poverhnostnogo sloya detaley [Technological support of the state parameters of the surface layer of parts], Moscow: Mashinostroenie, 1987, 208 p. (in Russian).

6. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N. Development of Domestic Equipment for Laser Additive Technologies by Melting Metallic Powders // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. 2020(6). P. 649–653

7. Fedorov S., Albagachiev A., Isaenkova M., Yakovleva A., Zaripov V., Minushkin R. The effect of combined processing schedules on the value and nature of residual stresses in the surface layer of cylindrical friction pairs // The collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. electronic edition. 2019. 012032.

8. Yakovleva A.P., Albagachiev A.Y. Theoretical Investigation of the Influence of Combined Machining Modes on the Value and Character of Residual Stresses in the Surface Layer of Cylindrical Friction Pairs. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. Vol. 49(3). P. 237–242

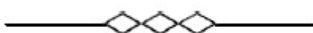
9. Yakovleva A., Isaenkova M., Minushkin R. The Effect of Combined Processing on Residual Stresses in the Surface Layer of Power Plant Parts // *Materials*. 2022. Vol. 15(2). 420.

**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 27.01.2023; одобрена после рецензирования 09.02.2023; принята к публикации 13.02.2023.

The article was submitted 27.01.2023; approved after reviewing 09.02.2023; assepted for publication 13.02.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №3 (141). С.19-22.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 19-22.

Научная статья  
УДК 621.9.011:621.9.048.4  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-19-22

## Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой

Анатолий Григорьевич Суслов<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Сергей Юрьевич Сьянов<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,  
г. Брянск, Россия

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

<sup>2</sup> SERG620@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Приведены теоретические зависимости для определения интенсивности изнашивания в зависимости от режимов и условий электроэрозионной обработки деталей машин исходя из энергетического подхода к процессам обработки и трения. Данные зависимости позволяют определить оптимальные режимы и условия электроэрозионной обработки для обеспечения требуемых параметров износостойкости (при одноступенчатом подходе – непосредственном технологическом обеспечении).

**Ключевые слова:** интенсивность изнашивания, электроэрозионная обработка, условия обработки

**Для цитирования:** Суслов А.Г., Сьянов С.Ю. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 3 (141). С. 19–22. doi: 10.30987/2223-4608-2023-19-22

## Single-stage engineering support of wear resistance of machine parts by EDM process

Anatoly G. Suslov<sup>1</sup>, D. Eng.,  
Sergey Yu. S'yanov<sup>2</sup>, Ph.D. Eng.  
<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University,  
Bryansk, Russia

<sup>1</sup> naukatm@yandex.ru, <sup>2</sup> SERG620@yandex.ru

**Abstract.** Theoretical dependences for determining the wear intensity, depending on the modes and conditions of EDM process of machine parts based on the energy approach to the processing and triboprocess, are given. These dependences make it possible to determine the optimal modes and conditions of EDM process for ensuring the required parameters of wear resistance (with a single-stage approach – direct engineering support).

**Keywords:** wear intensity, electrical discharge machining (EDM), processing conditions

**For citation:** Suslov A.G., S'yanov S.Yu. Single-stage engineering support of wear resistance of machine parts by EDM process. / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 3 (141). P. 19–22. doi: 10.30987/2223-4608-2023-19-22

В результате анализа современных исследований в области износостойкости деталей машин можно сделать вывод, что большинство деталей машин выходит из строя вследствие износа их поверхностей. Сократить затраты на изготовление и ремонт деталей машин, а также обеспечить требуемый срок их службы

возможно за счет одноступенчатого технологического обеспечения износостойкости.

Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой можно осуществлять двумя способами:

1) путем подстановки теоретических зависимостей параметров качества поверхностного

слоя от условий электроэрозионной обработки в уравнения для определения интенсивности изнашивания в периоды приработки и нормального изнашивания [1, 2];

2) на основе энергетического подхода к процессу электроэрозионной обработки и трения.

В работе рассмотрен второй способ одноступенчатого технологического обеспечения износостойкости электроэрозионной обработкой.

Из анализа работ [3 – 5] можно сделать вывод, что рабочие поверхности деталей при обработке и трении подвергаются сопоставимым воздействиям (силовым, температурным и химическим). Так же можно утверждать, что режимы и условия электроэрозионной обработки будут влиять на критический уровень энергии, который будет устанавливаться в процессе изнашивания поверхностей и необходимый для разрушения материала.

Согласно [4, 5] в качестве энергетических параметров, определяющих износостойкость обработанной поверхности, были приняты удельная энергия обработки  $E_{уд.обр}$  и удельная энергия трения  $E_{уд.тр}$ .

Удельная энергия трения рассчитывается по зависимости:

$$E_{уд.тр} = \frac{F_{тр}\Delta L_{тр}}{\Delta V_{тр}} = \frac{Nf\Delta L_{тр}}{\Delta V_{тр}}, \quad (1)$$

где  $F_{тр}$  – сила трения;  $\Delta L_{тр}$  – путь трения;  $\Delta V_{тр}$  – объем изношенного материала;  $N$  – нормальная нагрузка;  $f$  – коэффициент трения. Причем эта удельная энергия трения рассчитывается для установившегося периода изнашивания, когда сформировано равновесное состояние поверхностного слоя. Для повышения износостойкости поверхностей трения после их финишной, в том числе электроэрозионной обработки, должно быть обеспечено их равновесное состояние.

Интенсивность изнашивания рассчитывается по зависимости:

$$I_h = \frac{h_{и}}{\Delta L_{тр}}, \quad (2)$$

где  $h_{и}$  – линейный износ.

Путь трения рассчитывают по зависимости:  $\Delta L_{тр} = v_{ск}T_{и}k_{вп}$ , где  $v_{ск}$  – скорость скольжения;  $T_{и}$  – время испытания на изнашивание;  $k_{вп}$  – коэффициент взаимного перекрытия [6]:

$$k_{вп} = \frac{b_k}{l}, \quad (3)$$

где  $b_k$  – ширина площадки контакта индентора и образца;  $l$  – длина трущейся поверхности (для цилиндрических поверхностей  $l = \pi d$ , где  $d$  – диаметр трущейся поверхности).

Объем изношенного материала рассчитывают по формулам:

– для цилиндрических поверхностей:

$$\Delta V_{тр} = \pi dbh_{и}, \quad (4)$$

– для плоских поверхностей:

$$\Delta V_{тр} = lbh_{и}, \quad (5)$$

где  $b$  – ширина трущейся поверхности.

Для получения удельной энергии трения необходимо из (2) выразить путь трения и полученный результат вместе с уравнениями (4) и (5) подставить в (1). В результате получим:

– для цилиндрических поверхностей:

$$E_{уд.тр} = \frac{Nf}{\pi dbI_h}, \quad (6)$$

– для плоских поверхностей:

$$E_{уд.тр} = \frac{Nf}{lbI_h}. \quad (7)$$

Удельную энергию, затрачиваемую на электроэрозионную обработку, рассчитывают по следующей зависимости:

$$E_{уд.обр} = \frac{UIS\eta}{qf_{и}\Delta V_0}, \quad (8)$$

где  $U$  – напряжение, подаваемое на электроды;  $I$  – сила тока;  $f_{и}$  – частота следования импульсов;  $q$  – скважность импульсов;  $\Delta V_0$  – удаляемый объем материала в процессе электроэрозионной обработки;  $S$  – площадь обработки;  $\eta$  – коэффициент полезного действия энергии импульса.

Коэффициент полезного действия энергии импульса рассчитывается по методике, приведенной в работе [7]. Коэффициент полезного действия энергии импульса учитывает следующие потери теплоты:

– на нагрев и испарение жидкости, образование ударной волны и газового пузыря – коэффициент  $K1$ : при электроискровом режиме  $K1 = 0,5$ ; при электроимпульсном режиме  $K1 = 0,47$ ;

– на нагрев второго электрода – коэффициент  $K2$ : при вертикальном движении подачи для верхнего электрода  $K2 = 1 - \frac{2m}{m+1}$ , для нижнего электрода  $K2 = 1 - \frac{2}{m+1}$ ,

где  $m = \sqrt{\frac{\lambda_{в}c_{в}\rho_{в}}{\lambda_{н}c_{н}\rho_{н}}}$ . Здесь  $\lambda_{в}$ ,  $\lambda_{н}$  – коэффициенты теплопроводности верхнего и нижнего электродов соответственно;  $c_{в}$ ,  $c_{н}$  – удельные теплоемкости верхнего и нижнего электродов соответственно;  $\rho_{в}$ ,  $\rho_{н}$  – плотность материалов верхнего и нижнего электродов;

– коэффициент, зависящий от свойств среды – КЗ. Для различных диэлектрических сред принимает значения от 0,2 до 0 (для керосина КЗ = 0,2; для воды КЗ = 0).

Таким образом, имеем зависимость для расчета коэффициента полезного использования энергии импульса  $\eta_{и}$  [7]:

$$\eta_{и} = (1 - K1)(1 - K2)(1 - K3). \quad (9)$$

Подставляя в (9) значения коэффициентов K1, K2 и K3 для электроэрозионной обработки получим зависимость, определяющую коэффициент полезного действия энергии импульса:

$$\eta_{и} = \frac{0,92}{\sqrt{\frac{\lambda_{и}c_{и}\rho_{и}}{\lambda_{д}c_{д}\rho_{д}} + 1}}, \quad (10)$$

где  $\lambda_{и}$ ,  $\lambda_{д}$  – теплопроводности инструмента и детали соответственно;  $c_{и}$ ,  $c_{д}$  – удельная теплоемкость материала инструмента и детали соответственно;  $\rho_{и}$ ,  $\rho_{д}$  – плотность материала инструмента и детали соответственно.

Удаляемый объем материала в процессе электроэрозионной обработки рассчитывается по зависимости:

$$\Delta V_0 = Sh, \quad (11)$$

где  $h$  – толщина удаляемого материала.

Подставив (11) в (8) получим выражение для определения удельной энергии электроэрозионной обработки:

$$E_{уд.обр} = \frac{UI\eta}{qf_{и}h}. \quad (12)$$

Взаимосвязь между удельными энергиями при трении  $E_{уд.тр}$  и при электроэрозионной обработке  $E_{уд.обр}$  описывается при помощи одnofакторной статической модели:

$$E_{уд.тр} = b_0 E_{уд.обр}^{b_1}, \quad (13)$$

где  $b_0$  и  $b_1$  – коэффициенты.

При подстановке в выражение (13) уравнений (6), (7) и (12) получим выражение для определения интенсивности изнашивания после электроэрозионной обработки:

– для цилиндрических поверхностей:

$$I_h = b_0 \left( \frac{Nfqf_{и}h \left( \sqrt{\frac{\lambda_{и}c_{и}\rho_{и}}{\lambda_{д}c_{д}\rho_{д}} + 1} \right)^{b_1}}{0,92\pi dbUI} \right), \quad (14)$$

– для плоских поверхностей:

$$I_h = b_0 \left( \frac{Nfqf_{и}h \left( \sqrt{\frac{\lambda_{и}c_{и}\rho_{и}}{\lambda_{д}c_{д}\rho_{д}} + 1} \right)^{b_1}}{0,92lbUI} \right). \quad (15)$$

Полученные выражения (14) и (15) дают возможность определять интенсивность изнашивания после электроэрозионной обработки, а так же с их помощью можно решать и обратную задачу – по требуемой интенсивности изнашивания определить необходимые режимы (напряжение, ток, частоту следования и скважность импульсов) и условия электроэрозионной обработки (материал инструмента и вид диэлектрической жидкости). В настоящий момент разрабатывается методология проведения экспериментальных исследований, в результате которых будут определены коэффициенты  $b_0$  и  $b_1$  в уравнениях (14) и (15).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 11 (125). С. 30–37.
2. Сулов А.Г. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение. 2022. 552 с.
3. Сулов А.Г., Дальский А.Г. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
4. Сулов А.Г., Медведев Д.М. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин // СТН. 2010. № 8. С. 22–26.
5. Сулов А.Г., Медведев Д.М., Петрушин Д.И., Федонин О.Н. Система автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. № 5 (83). С. 40–44.

6. Карасик И.И. Методы типологических испытаний в национальных стандартах стран мира. М.: Наука и техника, 1993. 327 с.

7. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2-х т. Т. 1. М.: Высшая школа, 1983. 247 с.

#### REFERENCES

1. S'yanov S.Yu. Technological quality assurance of the surface layer and operational properties of machine parts by electroerosion treatment /Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 11 (125). pp. 30–37.

2. Suslov A.G. Fundamental principles of technological support of reliability of mechanical engineering products ed. by A.G. Suslov. Moscow: Innovative mechanical engineering, 2022, 552 p.

3. Suslov A.G., Dalsky A.G. Scientific foundations of mechanical engineering technology. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 684 p.

4. Suslov A.G., Medvedev D.M. Single-stage technological support of cylindrical surface wear-resistance of machine parts. STIN, 2010, no. 8, pp. 22–26.

5. Suslov A.G., Medvedev D.M., Petrishin D.I., Fedonin O.N. System of automated technological control of wear resistance of machine parts at cutting. Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2018, no. 5 (83), pp. 40–44.

6. Karasik I.I. Metody tribologicheskikh ispytaniy v natsional'nykh standartakh stran mira [Tribological test methods in national standards], Moscow: Publ. of Nauka i tekhnika, 1993, 328 p. (in Russian).

7. Artamonov B.A., Volkov Yu.S., Drozhalova V.I. Electrofizicheskie i electrohimicheskie metodi obrabotki materialov [Electrophysical and electrochemical materials processing techniques]. In 2 vols, vol. 1. Mo: Higher School, 1983, 247 p. (in Russian).

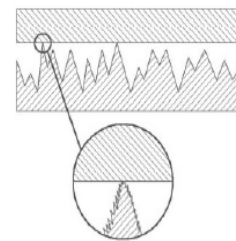
**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 05.12.2022; одобрена после рецензирования 08.12.2022; принята к публикации 26.12.2022.

The article was submitted 05.12.2022; approved after reviewing 19.12.2022; assepted for publication 26.12.2022.





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №3 (141). С. 23-37.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 23-37.

Научная статья  
УДК 621.785.53:620.178.16:620.186  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-37

## Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя

Лидия Ивановна Куксенова<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Мария Сергеевна Алексеева<sup>2</sup>, к.т.н.,  
Дмитрий Александрович Козлов<sup>3</sup>, к.т.н.

<sup>1,3</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва, Россия

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, ГИЦ РФ, г. Москва, Россия

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

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

<sup>3</sup> koslov74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Приведены результаты структурных и трибологических исследований сталей и сплавов перлитного, мартенситного и аустенитного классов после разных видов предварительной обработки и режимов азотирования. Результаты трибологических испытаний и металлофизических исследований позволили оценить эффективность каждого из использованных методов обработки и выявить характеристики структурного состояния азотированного слоя, способствующие повышению эксплуатационных свойств сталей в условиях трения и износа. Разработан комплексный физико-механический критерий для оценки эффективности азотирования деталей узлов трения.

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

**Для цитирования:** Куксенова Л.И., Алексеева М.С., Козлов Д.А. Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 3 (141). С. 23–37. doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-37

## Dependence of indicators of nitrited steels operational properties on the surface layer structural condition

Lidiya I. Kuksenova<sup>1</sup>, D. Eng.,  
Maria S. Alekseeva<sup>2</sup>, Ph.D. Eng.,  
Dmitry A. Kozlov<sup>3</sup>, Ph.D. Eng.

<sup>1,3</sup> Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences named after A.A. Blagonravov (IMASH RAS), Moscow, Russia

<sup>2</sup> RE "Kurchatov Institute" - VIAM, SSC RF, Moscow, Russia

<sup>1</sup> lkuc@mail.ru, <sup>2</sup> alekseeva\_ma@list.ru, <sup>3</sup> koslov74@mail.ru

**Abstract.** The results of structural and tribological studies of steels and alloys of pearlite, martensitic and austenitic classes using different types of pretreatment and nitriding modes are presented. The results of tribological tests and metallographic studies made it possible to evaluate the effectiveness of each of used treatment methods and to identify the characteristics of the structural state of the nitrided layer, contributing to an increase in the operational properties of steels in friction and wear conditions. A comprehensive physical and mechanical criterion has been developed to evaluate friction components nitriding efficiency.

**Keywords:** structural materials, steels and alloys, nitriding, structure, surface layers, wear resistance, operational properties

**For citation:** Kuksenova L.I., Alekseeva M.S., Kozlov D.A. Dependence of indicators of nitrited steels operational properties on the surface layer structural condition. / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 23–37. doi:

## Введение

В настоящее время для увеличения срока службы машин, оборудования и приборов, снижения их металлоемкости решается проблема улучшения эксплуатационных свойств конструкционных материалов на основе методов химико-термической обработки и разнообразных методов модифицирования поверхности изделий. Химико-термическая обработка рассматривается не просто как способ упрочнения приповерхностных слоев изделий из сталей и сплавов, но и как метод инженерии поверхности.

Предмет инженерии поверхности включает разработку теории научно обоснованных способов достижения таких механических и физико-химических свойств материала, которые обеспечивают надежность, долговечность и безопасность эксплуатации технических изделий, в частности, узлов трения.

Сопротивление изнашиванию металлических материалов является структурно-чувствительной характеристикой [1]. Исследования структуры и свойств поверхностных слоев металлических материалов показывают, насколько сложны и разнообразны поверхностные явления в условиях контактной деформации, когда поверхности взаимодействуют непосредственно между собой или через смазочную среду. В основе технологического обеспечения процесса формирования износостойкой структуры при химико-термической обработке лежат взаимосвязи между триботехническими характеристиками и исходной структурой стали, структурой, модифицированной при обработке, и структурой, полученной в зоне деформации при трении. Поэтому изучение структурно-фазовых превращений и деформации материала в тонком поверхностном слое при трении, которые определяются дислокационными и диффузионными механизмами в зоне контактной пластической деформации, способствует решению вопроса повышения износостойкости. В этой связи исследования структурных изменений при трении представляют

глубокий теоретический интерес и имеют важнейшее практическое значение [2, 3].

Азотирование является одной из эффективных и распространенных технологий упрочнения конструкционных сталей и сплавов, повышающей долговечность контактирующих под нагрузкой сопряжений. Промышленный технологический процесс азотирования прошел длительный путь развития. В настоящее время в технологии азотирования изучен ряд факторов управления процессом азотирования, изменение которых позволяет регулировать структурное состояние нитридного слоя и диффузионной зоны. Среди этих факторов, как правило, выделяют температуру и время азотирования, состав насыщающей среды и способы ее подачи, степень диссоциации аммиака, элементный состав стали, предварительные методы обработки, активизирующие процессы диффузионного насыщения [4 – 7].

Ниже представлены результаты исследований зависимости триботехнических параметров (твердости, износостойкости, контактной выносливости) от характеристик структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях изделий из конструкционных сталей разных классов после разных видов предварительной обработки и последующего азотирования с целью выявления условий формирования износостойкого структурного состояния, обеспечивающего надежность, долговечность и безопасность эксплуатации узлов трения.

## Методика проведения исследований

Исследовали стали и сплавы с разным типом решетки матрицы: на основе  $\alpha$ -Fe с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК) – стали перлитного и мартенситного классов (40X, 38X2MЮА, ВКС-7, ВКС-10, модельные сплавы Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-Al, содержащие ~ 4,0 атомных процента (ат. %) легирующего элемента); на основе  $\gamma$ -Fe с гранцентрированной кубической решеткой (ГЦК) – модельные сплавы, легированные Ni (29 ат. %), Cr, Al, Ti в количестве до 4,0 ат. % и аустенитная сталь 12X18H10T.



Применяли газовое азотирование в среде диссоциированного аммиака и азотирование в тлеющем разряде (ионное азотирование).

В основу выбора средств экспериментального исследования положен трибологический метод оценки качества поверхностных микрообъемов образцов из металлических материалов. Он включает оценку микроскопических характеристик материала зоны контактной деформации (физического уширения рентгеновских линий, фазового состава, размера упрочняющих частиц и плотности их распределения) и макроскопическую характеристику пары трения в целом – износостойкость стали, связанную с уровнем поверхностного разрушения в условиях контактной деформации. Микроскопические критерии выявляют структурное состояние зоны деформации при трении, макроскопические – отражают механизм контактного взаимодействия, связанный с деформацией и разрушением поверхности, а в совокупности они характеризуют качество материала поверхностного слоя с позиций трибологии [8, 9].

Оценку триботехнических свойств проводили по нескольким схемам испытаний: на стенде с возвратно-поступательным движением плоских сопрягаемых образцов при давлении  $p = 10 \dots 40$  МПа и скорости скольжения  $v = 0,19$  м/с в пластичных смазочных материалах; на стенде СМЦ-2 в условиях качения с проскальзыванием при  $N = 500$  Н ( $p = 348$  МПа)

и  $v = 0,96$  м/с в масле И-20А; для схемы скольжения ролика по плоскости использовали машину трения Шкода-Савин при числе оборотов ролика  $675 \text{ мин}^{-1}$  и давлении 150 Н; испытания на контактную усталость проводили на двухпозиционном стенде Ш-17, моделирующем качение с проскальзыванием с имитацией работы азотированного слоя зубчатых колес при скорости качения 25,47 м/с в масле И-20А; оценку контактной долговечности азотированной стали проводили на машине МКВ-К на роликах по схеме точечного контакта.

Для оценки структурного состояния поверхностных слоев применяли металлографический, рентгеноструктурный и электронно-микроскопический методы, с помощью которых оценивали фазовый состав, характеристики субструктуры матрицы и нитридов, размеры упрочняющих частиц, плотность их распределения, критическую плотность дислокаций, запас деформационной способности.

### Результаты исследований и обсуждение

Рассмотрим влияние легирующих элементов на комплекс микроскопических параметров и макроскопических характеристик азотированных сплавов. Результаты оценки физического уширения рентгеновских линий  $\beta_{(220)}$ , твердости HV и относительной износостойкости  $I_{отн}$  модельных сплавов представлены в табл. 1.

### 1. Характеристики сплавов, азотированных при 540 °С

Материал	Физическое уширение линий $\beta_{(220)}$ , мрад	Твердость HV, МПа	Относительная износостойкость, $I_{отн}$
Fe	10	1250	0,2
Fe + 4 % Mo	24	5300	1,2
Fe + 4 % Al	37	9400	2,2
Fe + 4 % Cr	27	7250	1,8
Fe + 3 % Cr	27	7200	1,5
Fe + 2 % Cr	26	7000	1,0
Fe + 1 % Cr	25	6250	0,5

Из представленных данных следует, что для сплавов с решеткой  $\alpha$ -Fe, легированных разными элементами (Mo, Cr, Al) и азотированных при одинаковой температуре (540 °C), наблюдается прямая корреляция между твердостью диффузионной зоны и износостойкостью: чем выше твердость, тем выше относительная износостойкость сплава.

Рентгеноструктурные исследования субструктурных характеристик показали, что при увеличении твердости и износостойкости возрастает и физическое уширение (220)  $\alpha$ -фазы  $\beta_{(220)}$ . При увеличении концентрации легирующего элемента, например Cr от 1,0 до

4,0 %,  $\beta_{(220)}$  резко возрастает до концентрации Cr 1,0...2,0 %, а далее практически остается на том же уровне, аналогично изменяется твердость, а износостойкость возрастает в 3,6 раза (см. табл. 1). Последнее указывает не только на роль степени легирования сплава, но и косвенно на роль температуры азотирования. Следует заметить, что подобное влияние количества нитридов Cr на износостойкость нами было установлено для нержавеющей стали 12X18H10T [2].

Изменение  $\beta_{(220)}$ , HV и  $I_{отн}$  в сплаве Fe + 4,0 % Cr зависимости от температуры азотирования иллюстрирует рис. 1.

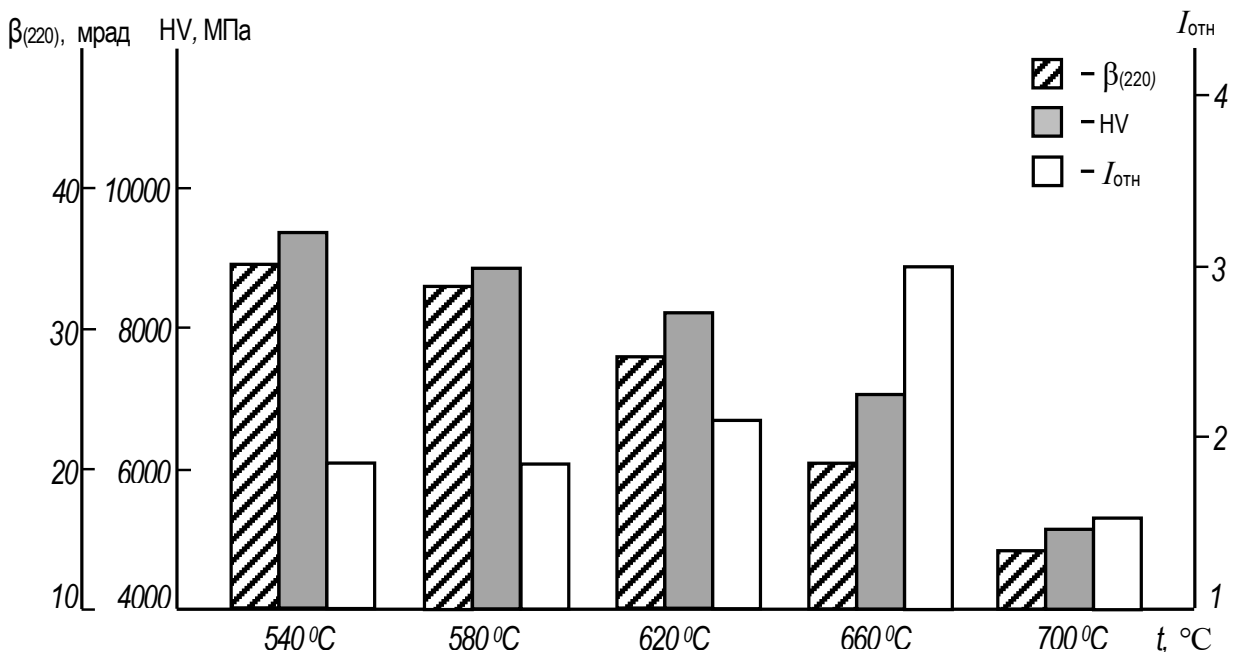


Рис. 1. Влияние температуры азотирования на микротвердость HV, физическое уширение рентгеновских линий  $\alpha$ -фазы  $\beta_{(220)}$  и относительную износостойкость  $I_{отн}$  сплава Fe + 4,0 % Cr

При увеличении температуры азотирования наблюдается монотонное снижение физического уширения  $\beta_{(220)}$  (связанное со снижением уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы) и, соответственно, микротвердости сплава. Износостойкость при этом имеет максимум при температуре азотирования 660 °C и составляет  $I_{отн} \approx 3$ . Заметим, что для сплава с 1,0 % Cr максимум износостойкости соответствует температуре 620 °C,  $I_{отн} \approx 2,1$ .

Результаты электронномикроскопических исследований сплавов с 1,0 % и 4,0 % Cr (с матрицей  $\alpha$ -Fe), показали особенности микроскопической картины сплавов с разным количеством хрома в зависимости от температуры азотирования. С повышением температуры азотирования в сплавах происходит увеличение размера частиц нитридной фазы ( $\delta$ ) и уменьшение плотности их распределения (увеличение  $L$ ) (рис. 2).

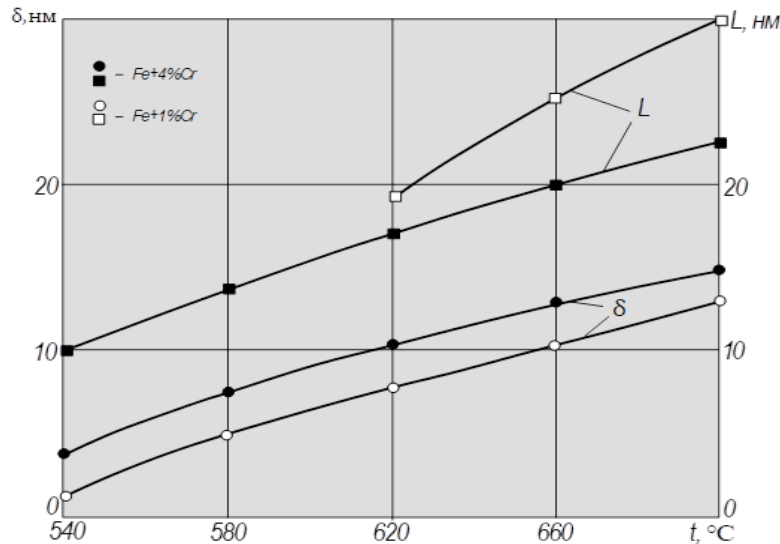


Рис. 2. Зависимость размера нитридов  $\delta$  и расстояния между ними  $L$  от температуры азотирования сплавов Fe + 1,0 % Cr и Fe + 4,0 % Cr

При температуре азотирования 540 °C в сплаве Fe + 4,0 % Cr образуются нитриды размером ~ 4 нм, в то время как в сплаве Fe + 1,0 % Cr их размер составляет ~ 1,5 нм. Увеличение температуры до 620...660 °C приводит к увеличению размеров нитридов в сплаве Fe + 1,0 % Cr до 8...10 нм, а в сплаве Fe + 4,0 % Cr – до 11...12 нм. Максимальная износостойкость для исследуемых сплавов наблюдается при формировании

нитридов легирующих элементов со средним размером частиц ~ 10 нм и расстоянием между ними ~ 10...15 нм. Аналогичные закономерности наблюдались также для перлитной стали 38X2MЮА.

В исследованных сплавах с решеткой  $\gamma$ -матрицы наблюдается другая закономерность взаимосвязи между структурой, твердостью и износостойкостью (рис. 3).

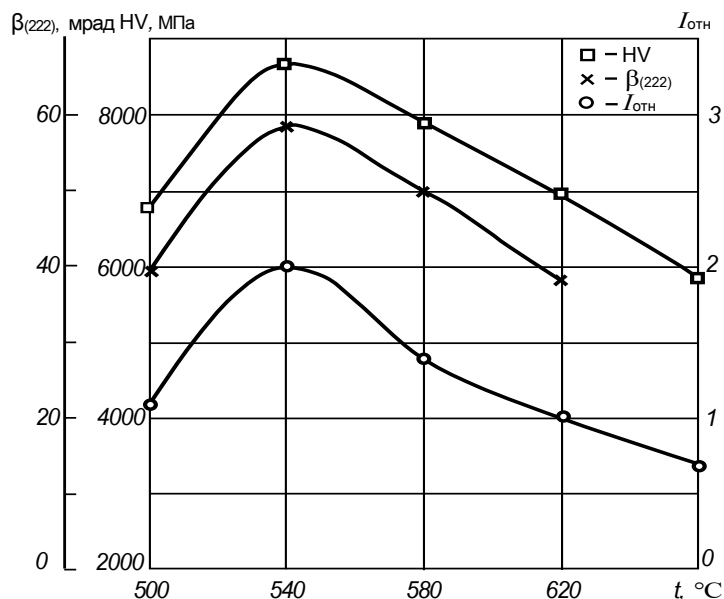


Рис. 3. Влияние температуры азотирования на физическое уширение интерференционной линии  $\gamma$ -фазы  $\beta(222)$ , твердость HV и износостойкость  $I_{отн}$  азотированного слоя комплекснолегированного аустенитного сплава Fe + 29 % Ni + 4,0 % (Cr-Al-Ti)

Исследование влияния температуры азотирования на физическое уширение, твердость и износостойкость азотированного слоя проводили на модельном комплекснолегированном сплаве с  $\gamma$ -основой Fe + 29 % Ni + 4,0 % (Cr-Al-Ti), который азотировали в интервале температур 500...660 °С. Показано, что  $\beta_{(222)}$ , HV и  $I_{отн}$  изменяются по кривой с максимумом, который наблюдается для всех исследуемых характеристик при температуре 540 °С, и составляет  $\beta_{(222)} = 57$  мрад, 8700 HV,  $I_{отн} \approx 2,0$ .

Таким образом, для сплавов аустенитного класса (на основе матрицы с ГЦК решеткой) во всем традиционно применяемом диапазоне температуры азотирования наблюдается единая закономерность изменения параметров  $\beta_{(222)}$ , HV,

$I_{отн}$  (синхронный рост или понижение) (см. рис. 3), в отличие от сплавов с матрицей, имеющей ОЦК решетку ( $\alpha$ -Fe). В последнем случае при повышении температуры азотирования до 660 °С снижаются  $\beta_{(220)}$  и HV, а  $I_{отн}$  растет (см. рис. 1).

Влияние типа нитридообразующего элемента (Cr, Al, Ti) на взаимосвязь характеристик структуры и износостойкости диффузионных слоев сплавов с аустенитной матрицей (Fe + 29 % Ni), азотированных при температуре 540 °С, показано на рис. 4. Видно, что все исследуемые параметры, характеризующие свойства сплавов, зависят от типа легирующего элемента.

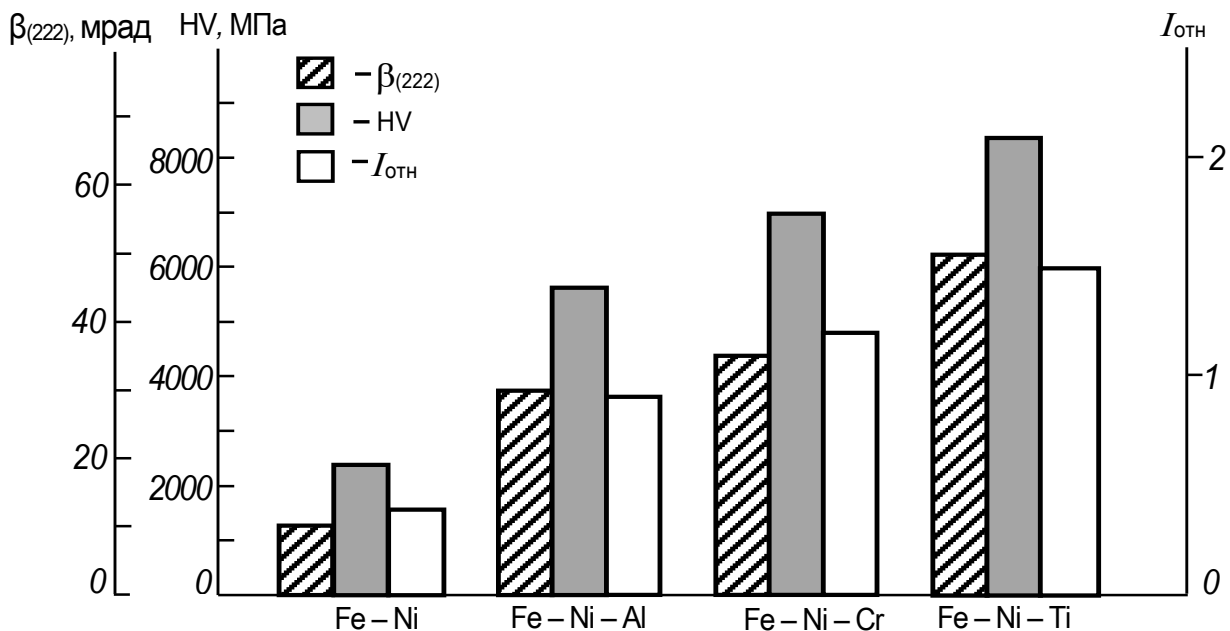


Рис. 4. Влияние состава сплава на физическое уширение интерференционной линии  $\gamma$ -фазы  $\beta_{(222)}$ , твердость HV и износостойкость  $I_{отн}$  азотированного сплава

При легировании аустенита титаном наблюдается более значительное уширение ( $\beta_{(222)} \approx 50$  мрад), чем при легировании хромом ( $\beta_{(222)} \approx 35$  мрад). Минимальное изменение физического уширения достигается в азотированном слое сплава, легированного алюминием ( $\beta_{(222)} \approx 30$  мрад). Такое влияние нитридообразующих элементов на структурное состояние матрицы в азотированном слое находится в соответствии с их воздействием на уровень твердости и износостойкости слоя, т.е. легирующие элементы, вызывающие

большее физическое уширение интерференционной линии  $\gamma$ -фазы  $\beta_{(222)}$ , обеспечивают более высокий уровень твердости и износостойкости в результате азотирования при 540 °С: для сплава с титаном HV = 8400 МПа,  $I_{отн} = 1,5$ ; для сплава с алюминием HV = 5600 МПа,  $I_{отн} = 0,9$ . Результаты электронномикроскопических и рентгеноструктурных исследований показали, что зависимости микро- и макроскопических показателей поверхностного слоя азотированной пары трения связаны с размером и плотностью

распределения упрочняющих частиц, а также уровнем микроискажений кристаллической решетки матрицы при фиксированных температурах азотирования.

На примере комплекснолегированного сплава, содержащего одновременно титан, хром, алюминий в количестве ~ 4,0 ат. %, азотированном при низких температурах (450 °С), электронномикроскопическим методом показано, что образуются зародыши нитридной фазы, когерентные матрице; размер когерентных зародышей и расстояние между ними предельно малы. Поэтому их триботехническая эффективность тоже мала вследствие высокого уровня микродеформации решетки матрицы. При температуре азотирования ~ 500 °С происходит частичное нарушение когерентности, размер упрочняющих частиц растет, однако при появлении полукogerентной границы упругие искажения матрицы не значительно уменьшаются, т. к. сохраняется высокая плотность дислокаций несоответствия, поэтому изменение износостойкости незначительное [2]. Дальнейшее повышение температуры азотирования вызывает формирование некогерентных границ, что приводит к снижению искажений на границе раздела частица-матрица, связанных с несоответствием решеток нитридной фазы и матрицы. Состав нитридных частиц на этой стадии соответствует составу равновесных нитридных фаз, и прочность самих частиц достигает максимального значения. Необходимо отметить, что в момент, предшествующий полному нарушению когерентности, плотность дислокаций несоответствия достигает максимального значения. В то же время состав и прочность нитридных частиц максимально приближаются к составу равновесных нитридных фаз. Тем не менее, происходит некоторое снижение твердости слоя, т. к. исчезает такой фактор упрочнения, как поля упругих искажений нитридных частиц.

Из вышеизложенного следует, что максимальное упрочнение при азотировании исследуемых аустенитных сплавов можно ожидать на стадии, предшествующей образованию некогерентных нитридных частиц. В сплавах Fe + 29 % Ni + 4,0 % (Cr-Al-Ti) такая стадия зафиксирована при азотировании 540 °С, когда образуются

мелкодисперсные комплексы нитридной фазы, только частично когерентные матрице. Максимальная износостойкость соответствует определенному размеру некогерентных (полукogerентных) нитридных частиц и высокому уровню упрочнения. С увеличением температуры азотирования твердость резко снижается, что вызывает снижение износостойкости аустенитных сплавов. Следовательно, для сталей с  $\gamma$ -матрицей также наблюдаются соответствия между физическим уширением, твердостью и износостойкостью азотированного слоя в широком диапазоне температур азотирования (500...660 °С), но закон соответствия отличается от сталей с  $\alpha$ -матрицей. Причиной этого является по-разному изменяющийся уровень микродеформации кристаллической решетки матрицы. Следовательно, все мероприятия, приводящие к увеличению твердости азотированного слоя аустенитных сталей (с  $\gamma$ -матрицей), одновременно позволяют создать более износостойкие поверхностные слои; для сталей с  $\alpha$ -матрицей повышение твердости не является условием повышения износостойкости в применяемом диапазоне температур азотирования.

Известно, что в условиях контактного взаимодействия основным процессом является упругопластическая деформация, которая приводит к изменению площади фактического контакта, развитию физического рельефа, оказывает влияние на тепловой режим работы зоны контакта, формирование сил трения и разрушение поверхности [10 – 12]. При нормальном изнашивании пластическая деформация активирует поверхностные слои, способствуя образованию вторичных структур, защищающих поверхность от разрушения; при повреждаемости она проявляет усиленное активирование поверхностных слоев металла, способствуя развитию схватывания. Основываясь на фундаментальных законах внешнего трения, можно полагать, что для азотированных сталей и сплавов характеристика способности поверхностного слоя воспринимать пластическую деформацию и подвергаться деформационному упрочнению может служить средством контроля и совершенствования режимов обработки деталей триботехнического назначения.

Ниже приведены результаты анализа деформационного упрочнения азотированного слоя сталей перлитного и мартенситного классов с когерентными и некогерентными нитридными частицами и вследствие этого с разным уровнем микродеформации кристаллической решетки матрицы ( $\alpha$ -твердого раствора

на основе железа). Деформационное упрочнение осуществляли гидродробеструйным методом. Способность к деформации и деформационному упрочнению оценивали по приращению физического уширения интерференционной линии (220) матрицы и микротвердости поверхностного слоя (рис. 5)

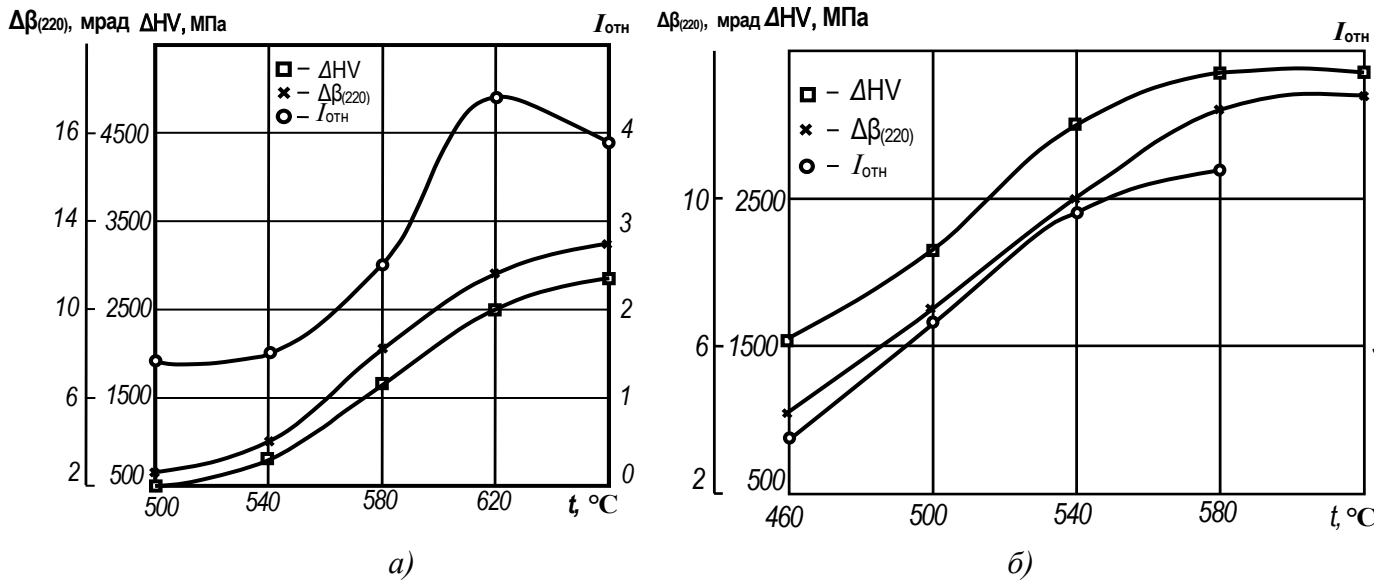


Рис. 5. Влияние поверхностной пластической деформации на прирост твердости  $\Delta HV$ , физического уширения  $\Delta \beta$  интерференционной линии (220)  $\alpha$ -фазы и износостойкость  $I_{отн}$  азотированных сталей:  
а – 38X2MЮА; б – ВКС-7

В стали 38X2MЮА, азотированной при низких температурах (500...540 °C), обеспечивающих образование полностью когерентных зародышей нитридов и вызывающих максимальную микродеформацию кристаллической решетки матрицы, прирост микротвердости и физического уширения линии (220) после наклепа дробью минимален (см. рис. 5, а). Наклеп дробью этой же стали, азотированной при температуре 620 °C, при которой образуются нитридные выделения с нарушенной когерентностью, приводит к значительному приросту микротвердости ( $\Delta HV = 2500$ ) и физического уширения интерференционной линии (220) ( $\Delta \beta_{(220)} = 12$  мрад) (см. рис. 5, б); при этом относительная износостойкость стали соответствует максимальному значению 4,5.

В сталях мартенситного класса эффект деформационного упрочнения выше по сравнению со сталями перлитного класса после азотирования при одних и тех же температурах, что связано с образованием в этих сталях преимущественно некогерентных упрочняющих

нитридных частиц. Прирост микротвердости и физического уширения интерференционной линии (220)  $\alpha$ -фазы стали ВКС-7, азотированной при температуре 540 °C, составляет 3000 МПа и 10 мрад соответственно, в то время как для стали 38X2MЮА, азотированной при той же температуре – 750 МПа и 4 мрад соответственно. Следовательно, стали перлитного класса после азотирования имеют существенно больший запас деформационной способности (и, следовательно, более длительный период до разрушения поверхностного слоя в условиях контактной деформации), чем стали мартенситного класса. Этот фактор имеет важное значение для условий трения и поверхностного разрушения.

Из проведенных экспериментов следует, что существует закономерность между эффектом деформационного упрочнения азотированных сталей, степенью когерентности упрочняющей фазы стали и максимальной износостойкостью. В связи с этим материал, имеющий больший запас деформационной способности

(пластичности) будет иметь и большую способность сопротивляться изнашиванию. Поэтому при выборе температуры азотирования для достижения высоких триботехнических характеристик материалов пар трения скольжения необходимо в первую очередь рассматривать характеристики структурного состояния азотированного слоя, которые определяют способность материала упрочняться при деформации, т.е. в исходном до трения состоянии они должны иметь запас по эффекту деформационного упрочнения, который может определяться экспериментально по величине  $\beta_{(hkl)}$ .

Разрушение поверхностных слоев и отделение частиц износа обусловлены процессом накопления повреждаемости в приповерхностном деформированном микрообъеме до критического значения. С величиной критической повреждаемости связана критическая плотность дислокаций ( $\beta_{кр}$ ), которая может быть определена рентгеновским методом по

соотношению  $\rho = A\beta_{(hkl)}^2$ , где  $A$  – постоянный коэффициент, зависящий от упругих свойств материала, вектора Бюргерса и др., и для многих металлов и сплавов численно равен  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Из данных анализа  $\beta_{(hkl)}$  разных сталей, приведенного в табл. 2 следует, что плотность дислокаций матрицы ( $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Fe) по глубине слоев отличается более чем в 1,5 раза. Кроме того, критическое значение  $\beta_{(кр)}$  (т.е. значения, соответствующие появлению задиров) исследуемых сталей отличаются в пределах точности эксперимента, и для тяжелых условий трения составляют величину  $\sim 60 \cdot 10^{-3}$  рад. Разность значения ( $\beta_{кр} - \beta_0$ ) является характеристикой запаса пластичности (деформационной способности при контактной деформации). Именно эта величина, существенно отличающаяся для сталей перлитного и аустенитного классов, определяет различие уровней их поверхностного разрушения при трении скольжения.

## 2. Физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(hkl)} \cdot 10^3$ , рад

Сталь	Глубина слоев, мкм								
	0,1	0,2	0,7	1,0	1,5	2,5	3,5	8,5	$\beta_{кр} - \beta_0$
38Х2МЮА до трения	35	–	–	35	–	35	35	35	$(60 - 25) = 35$
38Х2МЮА после трения	60	56	47	45	40	35	33	32	–
сплав с $\gamma$ -матрицей до трения	57	55	55	–	–	55	55	55	3 – 5

Таким образом, для разных температур азотирования сплавов на основе железа с ОЦК ( $\alpha$ -Fe) и ГЦК ( $\gamma$ -Fe) решетками экспериментально выявлены наиболее значимые характеристики структурного состояния, влияющие на износостойкость материала поверхностных слоев. К ним относятся размер частиц нитридов легирующих элементов (специальных нитридов) и расстояние между ними, плотность распределения упрочняющих частиц, микродеформация кристаллической решетки твердого раствора на основе железа, значения физического уширения рентгеновских линий (показатель запаса

пластичности и деформационной способности) азотированного твердого раствора и, следовательно, материала зоны контактной деформации, твердость азотированного слоя и ее изменения при деформации. Кроме того, проведенный нами комплекс экспериментальных исследований позволил сформулировать представления о структурном состоянии азотированного слоя в сталях перлитного, мартенситного и аустенитного классов, в основе которых лежит установленная совокупность характеристик структурного состояния, влияющая на износостойкость азотированных сталей [2].

В зависимости от химического состава, плотности дефектов строения матрицы и температурно-временных параметров азотирования в диффузионном слое образуются три типа нитридных выделений, отличающихся размерами, морфологией и взаимодействием с кристаллической решеткой матричной фазы. Первый – тонкие, однослойные зародыши нитридной фазы, полностью когерентные с решеткой матрицы: они возникают при низких температурах азотирования (~ 500 °С); второй – при более высоких температурах (~ 540 °С) – полуккогерентные выделения; третий – при температурах 560...620 °С – с нарушенной когерентностью.

В сталях перлитного и аустенитного классов преимущественным является гомогенное зарождение нитридных частиц, в сталях мартенситного класса – гетерогенное зарождение. В сталях мартенситного класса при низких температурах азотирования 500...520 °С одновременно присутствуют матричные когерентные зародыши нитридной фазы размером в несколько нанометров и некогерентные, образующиеся на дефектах кристаллического строения, размером 10...15 нм [2]. При этом комплексное легирование нитридообразующими элементами сталей уменьшает размер выделившихся в

азотированном слое частиц нитридов (что связано с изменением коэффициентов диффузии легирующих элементов и азота) и соответственно изменяет соотношение  $\beta_{(hkl)}$ , HV,  $I_{отн}$ . Формирование нитридов в стали при азотировании реализуется по двум механизмам: гомогенному – на сегрегациях легирующих элементов и гетерогенному – на дефектах кристаллического строения. Нитриды, образовавшиеся преимущественно на дефектах кристаллического строения, в меньшей степени искажают кристаллическую решетку матрицы, чем нитриды, выделившиеся на сегрегациях в твердом растворе [13]. В связи с этим есть основания предполагать позитивную роль поверхностной пластической деформации перед азотированием в повышении эксплуатационных характеристик стали.

С этих позиций рассмотрим некоторые структурночувствительные методы направленного воздействия на стали, способствующие формированию более износостойкого структурного состояния азотированного слоя.

Исследовали сталь ВКС-7 после закалки, высокого отпуска (традиционной термической обработки), дробеструйной обработки и последующего азотирования при 520 °С. Результаты исследований приведены в табл. 3.

### 3. Характеристики структуры и долговечность азотированной стали ВКС-7

Обработка	Ni <sub>з.о.</sub> , %	N, %	$\beta_{(hkl)}$ , мрад	N <sub>50</sub> , 10 <sup>-6</sup> , циклов
Азотирование	15	0,7	35	10,2
ППД + азотирование	30	0,5	30	21,6

Обозначения: Ni<sub>з.о.</sub> – содержание никеля в зернограницных областях; N – содержание азота; N<sub>50</sub> – долговечность, соответствующая 50 %-ной вероятности разрушения

Видно, что при введении поверхностной пластической деформации (ППД) в технологию обработки происходит увеличение содержания никеля в зернограницных областях азотированной зоны, снижение физического уширения рентгеновских линий матрицы и двукратное повышение контактной долговечности. Есть основания полагать, что

повышение контактной долговечности азотированных сталей, подвергнутых ППД, связано с двумя основными структурными факторами:

1 – при деформации поверхностного слоя повышается плотность дефектов решетки матрицы, которая увеличивает количество некогерентных нитридов при азотировании и



снижает уровень микродеформации кристаллической решетки матрицы;

2 – ППД, повышая количество дефектов, увеличивает диффузионную подвижность элементов, в том числе никеля, способствуя его более активному перемещению к границам зерен при азотировании, что вызывает уменьшение охрупчивающего влияния границ зерен азотированного слоя [2]. Таким образом, ППД перед азотированием приводит к созданию более работоспособного поверхностного слоя в условиях контактной деформации, трения и изнашивания.

Известно, что структурные изменения, вызванные ППД, распространяются на глубину  $\sim 0,1$  мм, что, как правило, меньше глубины залегания максимальных касательных напряжений при циклических контактных нагрузках, т.е. ППД не реализует максимально возможный эффект. Тем не менее, фиксируемая позитивная роль ППД выявляет подход к повышению качества поверхности азотируемой стали, основанный на совмещении предварительной термической и объемной деформационной обработок стали, которые изменяют структурное состояние не только поверхностных слоев стальных образцов, но и всего их объема для последующей активизации процесса структурообразования в азотированном слое.

Для исследования роли объемной пластической деформации испытывали стали ВСК-7 и ВКС-10, подвергнутые осадке до 80 % при температуре ниже рекристаллизации, с последующим ионно-плазменным азотированием.

Результаты оценки интенсивности изнашивания образцов из сталей ВКС-7 и ВКС-10 при испытаниях по схемам реверсивного скольжения и качения с проскальзыванием показали, что эти величины не превышают значений  $I_h = 0,5 \cdot 10^{-10}$  и  $1,5 \cdot 10^{-9}$  соответственно, что является показателем более высокой износостойкости по сравнению с обработкой без предварительной деформации [14].

Полученный массив данных испытаний материалов разного состава и в разных условиях трения позволил выявить аналитическую связь между микроскопическими характеристиками поверхностного слоя (структурой) и макроскопическими характеристиками пары трения (относительной износостойкостью азотированного слоя).

Для аналитического описания кинетики разрушения поверхностных слоев конструкционных цементованных сталей при трении в работе [15] были предложены основы методологии структурного подхода к оценке износа. Предложенный метод предполагает единство механизмов, контролирующих структурное состояние поверхностных слоев при контактной деформации и статических испытаниях на растяжение. Рассмотрим применение аналитического описания механизма разрушения поверхностей трения для разработки критерия оценки качества азотирования деталей триботехнического назначения.

Разработка критерия оценки качества азотирования основывалась на установленной совокупности характеристик твердости, фазового состава, количественных и качественных характеристик упрочняющих фаз, структурного состояния матрицы и триботехнического параметра (относительной износостойкости) для разных условий обработки и испытаний. При рассмотрении дислокационной природы накопления повреждаемости в условиях деформации двухфазного поликристаллического материала принималось во внимание, что усталостное изнашивание является наиболее распространенным и универсальным механизмом поверхностного разрушения при трении. Под действием знакопеременных касательных напряжений в деформируемом поверхностном слое происходит зарождение дислокаций, движение, генерация, и аннигиляция. При накоплении высокой плотности дислокаций на устойчивых барьерах возникают субмикротрещины. При увеличении касательных напряжений субмикротрещины растут до реализации условия Гриффитса, после чего происходит быстрое распространение микротрещин, что приводит к отделению частиц износа.

Применительно к азотированному диффузионному слою разработанное нами выражение для безразмерного комплексного физико-механического параметра имеет вид:

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

где все величины, входящие в выражение, определялись экспериментально:  $H_0$  – твердость

стали до азотирования;  $\frac{\Delta d}{d}$  – микродеформация кристаллической решетки матрицы;  $D$  – средний размер блоков мозаики;  $b$  – вектор Бюргера;  $e$  – размер зоны сдвига при деформации;  $\delta$  – размер частиц упрочняющей фазы;  $C_y$  – концентрация частиц упрочняющей фазы, где  $C_y = \pi\delta^2/L^2$ , где  $L$  – расстояние между частицами, определяемое методом просвечивающей электронной микроскопии;  $k_1, k_2$  – постоянные, отражающие изменение твердости сталей и

геометрические характеристики дислокационных петель соответственно.

Экспериментальные значения относительной износостойкости каждого из исследуемых сталей и сплавов и соответствующие значения совокупности структурночувствительных характеристик, объединенных в величину  $K_{аз}$ , для условий трения скольжения от величины укладываются в единую линейную зависимость (рис. 6).

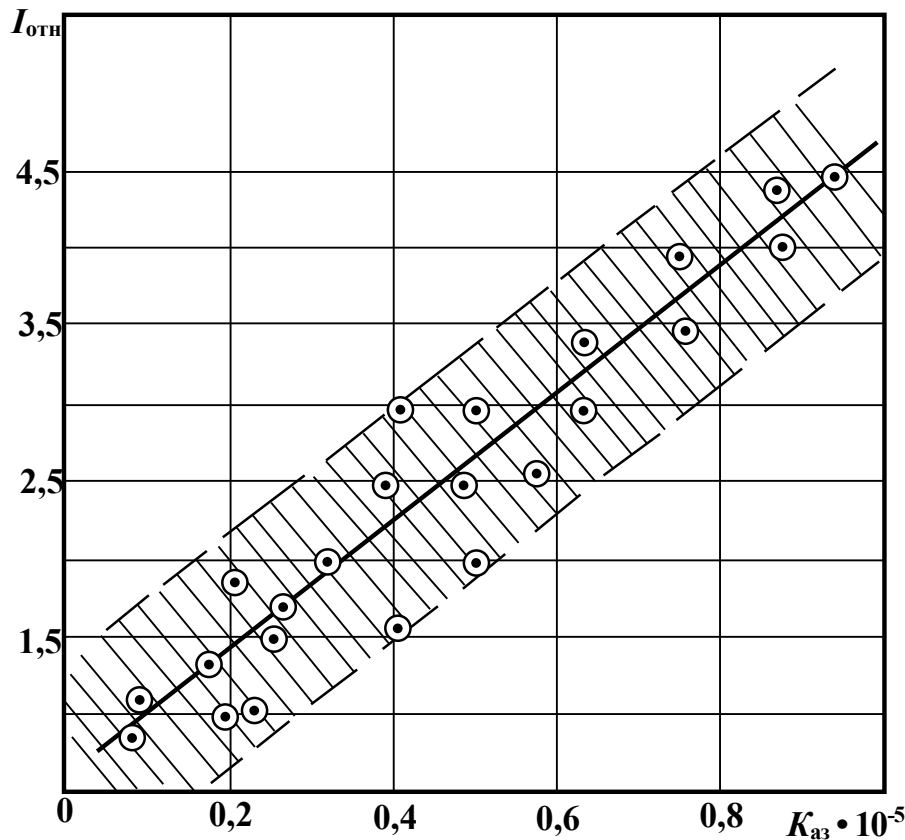


Рис. 6. Зависимость относительной износостойкости ( $I_{отн}$ ) от физико-механического параметра ( $K_{аз}$ ) азотированных сталей и сплавов

Отклонения значений  $I_{отн}$  от средней величины являются допустимыми для триботехнических испытаний и вызваны тем, что в процессе нагрева образцов до температуры азотирования возникают неоднородности ее распределения на разных расстояниях от поверхности. Поэтому могут образовываться разные структуры, соответствующие той температуре, которая достигается в каждом конкретном слое. В результате создается некоторая неоднородность структуры по толщине слоя, приводящая к изменению работоспособности

азотированной поверхности [16]. Тем не менее, проверка значимости коэффициента парной корреляции между относительной износостойкостью и коэффициентом  $K_{аз}$  по  $t$ -критерию дала положительный результат. Следует подчеркнуть, что значения  $K_{аз}$  и  $I_{отн}$ , соответствующие разным сплавам и разным условиям азотирования и укладываемые в единую линейную зависимость, указывают на высокую чувствительность разработанного комплексного физико-механического параметра к триботехнической характеристике, характеризующей

величину изменения уровня поверхностного разрушения азотированной стали в условиях контактной деформации. Экспериментальные исследования показали, что установленная зависимость  $I_{отн} = f(K_{аз})$  является инвариантной, поэтому она может служить расчетно-экспериментальным инструментом для оптимизации технологического процесса азотирования деталей триботехнического назначения.

Описанные выше результаты свидетельствуют, что азотированный поверхностный слой стали триботехнического назначения должен обладать противоречивым сочетанием свойств: высокой пластичностью и устойчивой к деформации плотностью дислокаций, не превышающей критический уровень. Экспериментальные исследования показали, что подобным сочетанием свойств обладает поверхностный слой, получаемый по специальной технологии азотирования, режимы которой назначены с учетом указанных выше структурночувствительных факторов. Впервые показано, что основу создания износостойкой структуры слоя, прилегающего к свободной поверхности, составляет фазовая перекристаллизация  $\epsilon \leftrightarrow \gamma' \leftrightarrow \alpha$  в азотированном слое, движущей силой которой служит изменение по ходу процесса азотного потенциала газовой среды. Механизм перекристаллизации вызывает образование зародышей кристаллов новой фазы внутри имеющейся (старой) фазы [17].

В условиях циклического изменения значения азотного потенциала развивается многократная фазовая перекристаллизация, и на поверхности детали формируется наноструктурированный нитридный слой. Важно, что наноструктурированный слой формируется непосредственно на поверхности упрочняемой детали по ходу процесса азотирования. В этом проявляется заметное преимущество фазовой перекристаллизации в качестве способа интенсивного измельчения зерна, формирования некогерентных нитридов и повышения износостойкости материалов узлов трения скольжения.

### Заключение

Долговечность и надежность машин не определяется какой-либо одной характеристикой механических свойств, поэтому необходимо улучшать комплекс свойств: показатели прочности и пластичности, твердости,

усталости. В ряде мероприятий, обеспечивающих повышение ресурса работы машин, особое место занимают проблемы износостойкости материалов, из которых они изготовлены. Одним из путей решения этих задач на современном уровне развития материаловедения являются способы направленного модифицирования изделий из конструкционных сталей, в частности применения методов химико-термической обработки.

Анализ закономерностей изменения структуры диффузионной зоны азотированных сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов и относительной износостойкости в зависимости от их состава и технологических параметров процесса обработки показал, что максимальной износостойкостью обладает азотированный слой, содержащий упрочняющие дисперсные частицы некогерентных нитридов, что обеспечивает снижение уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы и меньшую склонность стали к охрупчиванию.

Для азотированных сплавов на основе железа с ОЦК и ГЦК решетками экспериментально установлены наиболее значимые характеристики структурного состояния и свойств поверхностных слоев, влияющих на уровень поверхностного разрушения при трении: размер частиц нитридов легирующих элементов, расстояние между ними, микродеформация кристаллической решетки твердого раствора, значения физического уширения рентгеновских линий структурных составляющих материала зоны деформации при трении, твердость азотированного слоя и ее изменения при трении. На основе обобщения совокупности микроскопических и макроскопических характеристик пары трения разработан комплексный физико-механический параметр, учитывающий характеристики структуры и свойств как азотированного поверхностного слоя, так и зоны поверхностной пластической деформации при трении. Разработанное соотношение рекомендуется для оптимизации технологического процесса азотирования с позиций трибологии и оценки качества модифицированного при азотировании слоя.

Показано, что предварительная обработка азотируемых сталей является средством формирования структурно-фазового состояния

поверхностного слоя, обладающего повышенными триботехническими характеристиками. Температура предварительного отпуска стали влияет на соотношение когерентных, полуккогерентных и некогерентных нитридных частиц в диффузионной зоне при азотировании, предварительная пластическая деформация корректирует их соотношение в направлении увеличения доли некогерентных выделений, способствуя тем самым созданию более работоспособного в условиях контактной деформации и изнашивания поверхностного слоя.

Установлено, что пластическая деформация, осуществляемая после термической обработки, приводит к существенному повышению эксплуатационных свойств (в два раза повышается контактная долговечность). Связано это с тем, что в результате деформации повышается плотность дефектов структуры, что обуславливает увеличение диффузионной подвижности легирующих элементов при азотировании, уменьшению доли матричных когерентных выделений и, соответственно, снижению уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.Г. Поверхностная прочность металлов при трении / Под общ. ред. Б.И. Костецкого. Киев: Техника, 1976. 292 с.
2. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Оспенникова О.Г., Алексеева М.С., Громов В.И. Инженерия поверхности и эксплуатационные свойства азотированных конструкционных сталей / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2019. 600 с.
3. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.
4. Есипов Р.С., Абдуллин Р.А., Хусайнов Ю.Г., Николаев А.А. Ионное азотирование высоколегированных конструкционных сталей с ультрамелкодисперсной структурой при различных температурах. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 10. С. 102–107.
5. Прокофьев М.В., Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибииков П.С. Влияние стадийного азотирования на строение и свойства мартенситной стали 13X11H2B2MФ // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 12 (126). С. 12–19.
6. Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. № 1 (127). С. 3–10.

7. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Алексеева М.С., Данилов В.Д., Смирнов А.Е., Громов В.И. Повышение характеристик механических свойств теплостойких сталей методом активации процесса азотирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. №2. С. 90–95.

8. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Physical criteria of wear resistance of metal materials in surface-active lubricating media // Proc. The Conference on Tribology "Friction, Lubrication and Wear – 50 years on". London. IME, 1987. P. 419–426.

9. Савенко В.И., Щукин Е.Д. О соотношениях между феноменологическими и структурными критериями работы узлов трения // Трение и износ. 1987. № 4. С. 581–589.

10. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П. Проблемы материаловедения в трибологии. Новосибирск: НЭТИ, 1991. 64 с.

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

12. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 188. 240 с.

13. Мичугина М.С. Разработка структурного состояния азотированного слоя конструкционных сталей, ответственного за их износостойкость / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ (Государственный технический университет), 2008. 16 с.

14. Куксенова Л.И., Алексеева М.С. Влияние предварительной обработки конструкционных азотированных сталей на их триботехнические характеристики // МиТОМ. 2023. № 1. С. 10–15.

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

16. Куксенова Л.И., Мичугина М.С. Влияние условий нагрева при азотировании на структуру и износостойкость поверхностных слоев на стали 38X2MЮА // МиТОМ. 2008. № 2 (632). С. 29–34.

17. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Крапошин В.С., Лисоцкий И.В., Березина Е.В., Лаптева В.Г. Влияние нанокристаллической фазы нитридов железа на износостойкость азотированной стали 38X2MЮА // Матер. всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием «Машиностроительные технологии». М.: ИМАШ РАН, 2010, С. 216–218.

## REFERENCES

1. Kostetsky B.I., Nosovsky I.G., Karaulov A.G. Poverhnostnaya prochnost' metallov pri trenii [Surface strength of metals under friction]. Under the general editorship of B.I. Kostetsky. Kiev: Technika, 1976, 292 p. (in Russian).
2. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Oспенnikova O.G., Alekseeva M.S., Gromov V.I. Surface engineering and operational properties of nitrided structural steels. Under the general editorship of E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2019. 600 p.
3. Zinchenko V.M. Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoy obrabotki [Gear

surface engineering by thermal-chemical treatment methods]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2001. 303 p. (in Russian).

4. Esipov R.S., Abdullin R.A., Khusainov Yu.G., Nikolaev A.A. Ion nitriding of high-alloy structural steels having ultrafine structure at different temperatures. Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies, 2021, no. 10. pp. 102–107.

5. Prokofiev M.V., Petrova L.G., Belashova I.S., Bibikov P.S. The effect of stadial nitrogenization on the structure and properties of martensitic steel 13X11N2V2MF. Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, vol. 2021, no. 12(126), pp. 12-19. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-12-12-19.

6. Petrova L.G., Alexandrov V.A., Vdovin V.M., Demin P.E. Improvement of operation lifetime of high-speed steel tools when nitriding with controlled nitrogen potential. Science-intensive technologies in machine-building, 2022, no. 1 (127), pp. 3–10.

7. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Fakhurtdinov R.S., Alekseeva M.S., Danilov V.D., Smirnov A.E., Gromov V.I. Improvement of mechanical properties of heat-resistant steels by activation of the nitriding process. Problems of machine building and machine reliability, 2014, no. 2, pp. 90–95.

8. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Physical criteria of wear resistance of metal materials in surface-active lubricating media // Proc. The Conference on Tribology “Friction, Lubrication and Wear – 50 years on”. London. IME, 1987. P. 419–426.

9. Savchenko V.I., Shchukin E.D. On the relationship between phenomenological and structural criteria for the operation of friction units. Trenie i iznos, 1987, no. 4, pp. 581–589. (in Russian).

10. Tushinsky L.I., Poteryaev Yu.P. Problems of materials science in tribology. Novosibirsk: NETI, 1991. 64 p.

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

12. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. Pov-erkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin [Surface layer and service properties of machine parts] Moscow: Mashinostroenie, 188, 240 p. (in Russian).

13. Michugina M.S. Razrabotka strukturnogo sostoyaniya azotirovannogo sloya konstruktsionnih staley, otvetstvennogo za ih iznosostoykost' dis.kand. techn. nauk [Development of the structural state of the nitrided layer of structural steels responsible for their wear resistance. Ph.D. Extended Abstract of Thesis] Moscow: MAI (State Technical University), 2008, 16 p. (in Russian).

14. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. The influence of rough machining of structural nitrided steels on their tribotechnical characteristics. MiTOM, 2023, no. 1, pp. 10–15.

15. Drozdov Yu.N., Rybakova L.M., Litvinov I.P., Pavlik B.B., Sidorov S.A. Kinetics of fracture steel destruction under friction. Friction and wear, 1989, no. 5. pp. 773–778.

16. Kuksenova L.I., Michugina M.S. Influence of oxidation conditions on the structure and wear resistance of layers on steel 38Kh2MYuA. MiTOM. 2008. no. 2 (632). pp. 29–34.

17. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Kraposhin V.S., Lisotsky I.V., Berezina E.V., Lapteva V.G. Influence of the nanocrystalline phase of iron nitrides on the wear-resistant bone of nitrided steel 38Kh2MYuA. Ma-ter. All-Russian Scientific and Technical. conf. with international participation "Machine-building technologies". M.: IMASH RAN, 2010, p. 216–218.

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

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

Статья поступила в редакцию 24.01.2023; одобрена после рецензирования 30.01.2023; принята к публикации 03.02.2023.

The article was submitted 24.01.2023; approved after reviewing 30.01.2023; assepted for publication 03.02.2023.

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. №3 (141). С. 38-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 38-48.

Научная статья

УДК 539.621

doi: 10.30987/2223-4608-2023-38-48

## Эмпирический закон кинетики изменения силы трения скольжения при самопроизвольных изменениях состояния фрикционного контакта

Александр Джалюльевич Бреки<sup>1,2</sup>, д.т.н.

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

<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия  
albreki@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4452-3896>

**Аннотация.** Реализован анализ, уточнение и обобщение существующей эмпирической математической модели закона изменения силы трения от времени на случаи самопроизвольных изменений состояния фрикционного контакта твёрдых тел. С использованием адгезионно-деформационной теории трения построена феноменологическая модель зависимости силы трения от времени и пути, учитывающая самопроизвольные изменения состояния фрикционного контакта. Разработанная модель позволяет реализовывать интерпретацию эмпирических параметров и характеристик переходов с молекулярно-механической точки зрения.

**Ключевые слова:** математическая модель, трение скольжения, закон трения, время, путь трения, самопроизвольное изменение

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: «Применение цифрового моделирования и больших данных для повышения эффективности механической обработки титановых лопаток паровых турбин и их эксплуатации в условиях каплеударной эрозии» № 22-19-00178.

**Для цитирования:** Бреки А.Д. Эмпирический закон кинетики изменения силы трения скольжения при самопроизвольных изменениях состояния фрикционного контакта // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 3 (141). С. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-38-48

## Empirical kinetic law of force variation in the sliding frictional force during spontaneous changes in the state of friction contact

Alexander D. Breki<sup>1,2</sup>, D. Eng.,

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

<sup>2</sup> Institute of Problems of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia  
albreki@yandex.ru

**Abstract.** The analysis, model revisited and the generalization of the existing empirical mathematical model of the force variation law depending upon time in case of spontaneous changes in the state of the friction contact of solids, is completed. Using the adhesion-deformation theory of friction, a phenomeno-logical model of friction force dependence on time and sliding distance, is constructed, taking into account spontaneous changes in the state of frictional contact. The developed model makes it possible to interpret the transition empirical parameters and characteristics from a molecular-mechanical point of view.

**Keywords:** mathematical model, sliding friction, friction laws, time, sliding distance, spontaneous change

**Acknowledgments:** The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation for the priority area of activity of the Russian Science Foundation «Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups» to the scientific project: «Application of digital modeling and big data to improve the efficiency of mechanical processing of titanium steam turbine blades and their operation under conditions of drop impact erosion» No. 22-19-00178.

**For citation:** Breki A.D. Empirical kinetic law of force variation in the sliding frictional force during spontaneous changes in the state of friction contact. / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-38-48

Многие закономерности внешнего трения скольжения в связи с действием огромного количества факторов, и сложности процесса трения трудно поддаются математическому моделированию и, в ряде случаев, не имеют адекватного математического описания. Данная проблема создаёт дополнительные трудности для выявления и последующего практического использования закономерностей трения при проектировании, изготовлении, эксплуатации, ремонте машин и приборов для снижения энергетических потерь на трение и повышения их надёжности [1, 2]. Ключевыми факторами являются нагрузка, скорость, температура, продолжительность пребывания пары трения в состоянии покоя, время. Другие факторы взаимосвязаны с перечисленными факторами и в комплексе воздействуют на процесс трения, который ещё более усложняется при самопроизвольных изменениях состояния фрикционного контакта. Механизм внешнего трения тесно связан с природой внутреннего трения, а именно, с не упругостью и вязким сопротивлением контакта [3]. С этой точки зрения работы [3], как трение скольжения, так и трение покоя должно характеризоваться динамическим модулем, энергией активации процесса трения, временем релаксации и др., которые изменяются при самопроизвольных изменениях состояния поверхностей.

В случае трения покоя фрикционные связи могут находиться в контакте как угодно долго, при этом сила трения покоя меняется в

зависимости продолжительности контакта, что отражено в формуле И.В. Крагельского, выведенной с использованием уравнения Максвелла – Ишлинского [3, 4, 7, 8]:

$$F_{fs} = F_{fs\infty} - (F_{fs\infty} - F_{fs0}) \cdot \exp(-k_{rg} \cdot t_s), \quad (1)$$

где  $F_{fs}$  – сила трения покоя;  $F_{fs\infty}$  – сила трения покоя при  $t_s \rightarrow \infty$ ;  $F_{fs0}$  – сила трения покоя при  $t_s \rightarrow 0$ ;  $k_{rg}$  – константа, характеризующая реологические свойства материала и геометрию поверхностей;  $t_s$  – время неподвижного контакта твёрдых тел.

Формула (1) после простых преобразований приводится к следующему виду:

$$F_{fs} = F_{fs\infty} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_{fs0}}{F_{fs\infty}} \right) \cdot \exp(-k_{rg} \cdot t_s) \right]. \quad (2)$$

Костерин Ю.И. в работе [5, стр. 65] показал, что сила трения покоя может быть определена по эмпирической формуле [3]:

$$F_{fs} = F_{fs\infty} \left[ 1 - \exp(-k_{rg} \cdot t_s) \right], \quad (3)$$

в этом случае справедливо соотношение  $F_{fs0} \ll F_{fs\infty}$ , поэтому отношением данных величин в (2) можно пренебречь, при этом сила трения покоя  $F_{fs\infty}$  у Костерина Ю.И. нелинейно зависит от нормальной нагрузки.

Зависимости (2) и (3) подтверждаются экспериментальными результатами различных исследователей [3, 5 – 8 и др.]. Графики функции (3) при различных значениях параметров приведены на рис. 1.

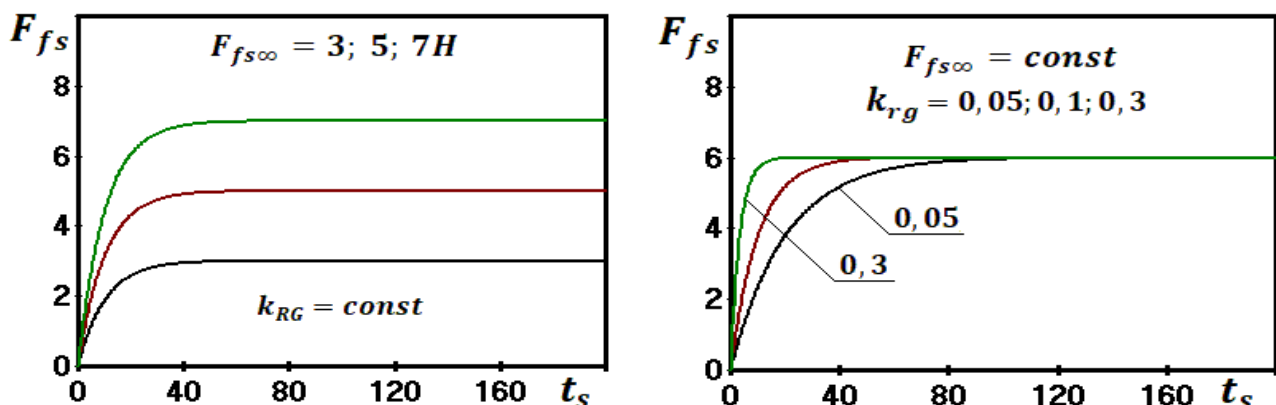


Рис. 1. Графики функции (3) при различных значениях параметров

С другой стороны, Кудинов В.А. в работах [9, 15] предложил формулу, аналогичную по форме (3), но для описания зависимости силы трения скольжения от времени [3, 15]:

$$F_f = f^* \cdot F_N^* \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{k_d}\right) \right], \quad (4)$$

где  $f^*$  – установившееся значение коэффициента трения скольжения (по Леонардо да Винчи – Амонтону);  $F_N^*$  – фиксированная нормальная нагрузка;  $k_d$  – константа, равная времени передеформирования поверхностей трения при постоянной скорости скольжения;  $t$  – время.

Бартенев Г.М. отметил, что формальное сходство у зависимостей силы трения (3) и (4) для статического и динамического контактов может являться одним из обоснований для перехода от зависимости силы трения по времени к зависимости по скорости [3].

С нашей точки зрения время передеформирования поверхностей трения в действительности зависит от реологических свойств материала, геометрии поверхностей и наличия на поверхностях частиц износа, поэтому (4), по аналогии с (3) правильнее записать следующим образом:

$$F_f = F_{fst} \cdot [1 - \exp(-\tilde{k}_{rg} \cdot t)]. \quad (5)$$

где  $F_{fst}$  – величина установившегося значения силы трения;  $\tilde{k}_{rg}$  – коэффициент, характеризующий реологические свойства материала, геометрию поверхностей в процессе их передеформирования, а также влияние частиц износа на фрикционное взаимодействие.

Графики (5) имеют вид, аналогичный графикам (3), что также соответствует ряду экспериментальных результатов (рис.2).

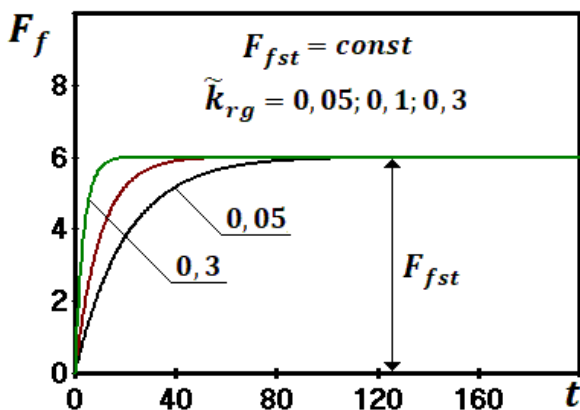


Рис. 2. Графики функции (12)

Следует отметить, что при скольжении происходят изменения состояния фрикционного контакта, существенно больше (частицы износа, разогрев и т.д.), чем при статическом

контакте, поэтому можно считать, что даже на начальном этапе трения ещё до достижения силой трения значения  $F_{fst}$  коэффициент  $\tilde{k}_{rg}$  зависит от пути трения. Примем, что коэффициент  $\tilde{k}_{rg}$  для случая зависимости и независимости от перемещения определяется следующим образом:

$$\tilde{k}_{rg} = \begin{cases} \tilde{k}_{rg}, & \tilde{k}_{rg}(l_f) = \text{const}, \\ k_\psi \cdot l_f = k_\psi \cdot v_f^* \cdot t, & \tilde{k}_{rg}(l_f) \neq \text{const}, \end{cases} \quad (6)$$

$k_\psi$  – параметр (1/мс), характеризующий интенсивность приращения  $\tilde{k}_{rg}$ , обусловленную изменением состояния фрикционного контакта при движении;  $l_f$  – путь трения,  $v_f^*$  – фиксированная (постоянная) скорость скольжения. Подставляя нижнюю часть (6) в (5), получим следующее уравнение:

$$F_f = F_{fst} \cdot [1 - \exp(-k_\psi \cdot v_f^* \cdot t^2)]. \quad (7)$$

Графики функции (7) приведены на рис. 3, а.

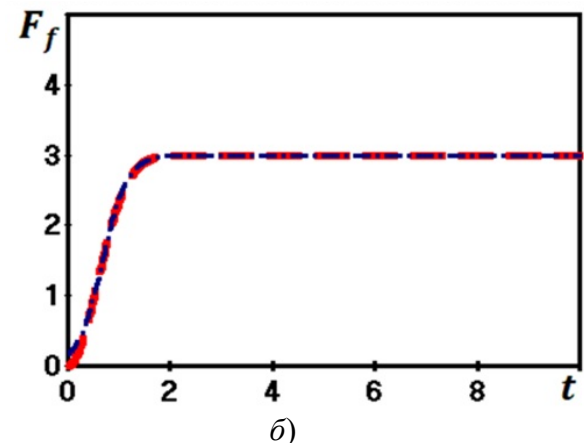
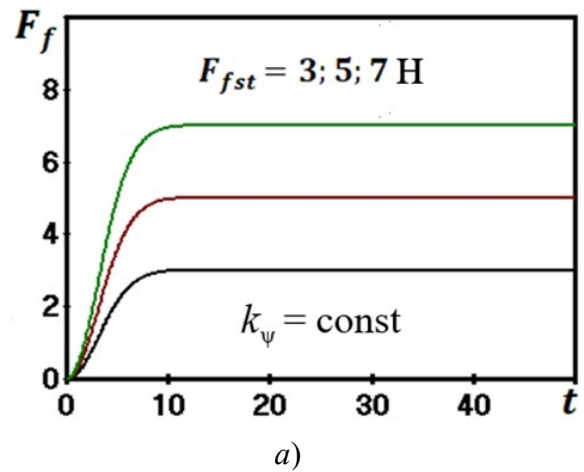


Рис. 3. Графики функций: а – (7) при различных значениях  $F_{fst}$ ; б – сопоставление функций (7) и (14)



В случае зависимости  $\tilde{k}_{rg}$  от пути трения кривые имеют сигмоидальный характер в интервале  $[0; \infty)$  (см. рис. 3, а), соответственно функция (7) может быть хорошо аппроксимирована следующей функцией [1, 2]:

$$F_f = \frac{F_{fst}}{1 + \exp(-\psi_t \cdot (t - t_\Omega))}, \quad (8)$$

где  $\psi_t$  – резкость фрикционного перехода от одного режима трения к другому (по времени);  $t_\Omega$  – время, соответствующее максимальной интенсивности изменения силы трения. Согласно работам [1, 2] параметр  $\psi_t$  находится из соотношения:

$$\psi_t = \frac{4 \cdot \Omega_{t_{max}}}{F_{fst}}, \quad (9)$$

где  $\Omega_{t_{max}}$  – максимальная интенсивность изменения силы трения по времени,

соответствующая (8). Дифференцируя (7), находим интенсивность изменения силы трения по времени:

$$\Omega_t = 2 \cdot F_{fst} \cdot k_\psi \cdot v_f^* \cdot t \cdot \left[ \exp(-k_\psi \cdot v_f^* \cdot t^2) \right]. \quad (10)$$

Функция (10) имеет максимум при  $t = t_{max} = 1 / \sqrt{2k_\psi \cdot v_f^*}$ , соответственно:

$$\Omega_{t_{max}} = F_{fst} \sqrt{\frac{2 \cdot k_\psi \cdot v_f^*}{e}}, \quad (11)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов (число Эйлера). Подставляя (11) в (9) имеем:

$$\psi_t = 4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_\psi \cdot v_f^*}{e}}. \quad (12)$$

Для отыскания параметра  $t_\Omega$  исходим из того, что для функции (8) при  $t = t_\Omega \Rightarrow F_f = F_{fst} / 2$  и положим данное условие справедливым для (7):

$$\begin{aligned} F_{fst} \cdot \left[ 1 - \exp(-k_\psi \cdot v_f^* \cdot t_\Omega^2) \right] &= \frac{F_{fst}}{2}, \Rightarrow \\ \exp(-k_\psi \cdot v_f^* \cdot t_\Omega^2) &= \frac{1}{2}, \Rightarrow k_\psi \cdot v_f^* \cdot t_\Omega^2 = \ln(2), \Rightarrow \\ t_\Omega^2 &= \frac{\ln(2)}{k_\psi \cdot v_f^*}, \Rightarrow t_\Omega = \sqrt{\frac{\ln(2)}{k_\psi \cdot v_f^*}}, \Rightarrow t_\Omega = t_{max} \sqrt{2 \ln(2)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Подставляя (12) и (13) в (8) получим:

$$F_f = \frac{F_{fst}}{1 + \exp\left(-4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_\psi \cdot v_f^*}{e}} \cdot \left(t - \sqrt{\frac{\ln(2)}{k_\psi \cdot v_f^*}}\right)\right)}. \quad (14)$$

Графики функций (7) и (14) приведены на рис. 3, б, откуда видно, что они практически совпадают. Отличие состоит в том, что при идентичных значениях параметров функция (7) выходит из нуля (красный график), а функция (14) близка к нулю при начале фрикционного взаимодействия.

Параметр  $F_{fst}$  интерпретируем с точки зрения адгезионно-деформационной (молекулярно-механической) теории трения. Согласно данной теории, сила трения складывается из двух составляющих [10, стр. 220]:

$$F_f = F_{fD} + F_{fA}, \quad (15)$$

где  $F_{fD}$  – деформационная составляющая силы внешнего трения;  $F_{fA}$  – адгезионная составляющая силы внешнего трения.

Деформационная составляющая силы трения равна [10, стр. 214]:

$$F_{fD} = \beta_d \cdot F_N, \quad (16)$$

где  $\beta_d$  – деформационная составляющая коэффициента трения (в нашем обозначении). Коэффициент  $\beta_d$  выражается различным образом для упругого, упругопластического и пластического контактов. Адгезионная составляющая силы трения равна [10, стр. 223]:

$$F_{fA} = \tau_{fA0} \cdot A_r + \beta_a \cdot F_N = \beta_a \cdot F_N + F_{fA0}, \quad (17)$$

где  $\tau_{fA0}$  – сдвиговая прочность адгезионной составляющей трения при нулевой нагрузке;  $A_r$  – фактическая площадь контакта;  $\beta_a$  – пьезокоэффициент адгезионной составляющей трения;  $F_{fA0}$  – адгезионная составляющая силы внешнего трения при нулевой нагрузке.

Подставляя (16) и (17) в (15) получим (для случая отсутствия отклонений от двучленного закона трения):

$$F_f = \beta_d \cdot F_N + \beta_a \cdot F_N + F_{fA0} = (\beta_d + \beta_a) \cdot F_N + F_{fA0}. \quad (18)$$

Поскольку  $F_{fst}$  есть установившееся значение силы трения при постоянной нагрузке и

скорости скольжения, то можно записать:

$$F_{fst} = F_{fDst} + F_{fAst} = (\beta_{dst} + \beta_{ast}) \cdot F_N^* + F_{fA0}, \quad (19)$$

где  $F_{fDst}, F_{fAst}$  – установившиеся во времени значения деформационной и адгезионной составляющей силы трения,  $F_{fA0} = \text{const}$ ;  $\beta_{dst}, \beta_{ast}$  – соответствующие установившиеся во времени значения составляющих коэффициента трения.

С учётом (19) зависимость (14) можно переписать в следующем виде:

$$F_f = \frac{(\beta_{dst} + \beta_{ast}) \cdot F_N^* + F_{fA0}}{1 + \exp\left(-4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_\psi \cdot v_f^*}{e}} \cdot \left(t - \sqrt{\frac{\ln(2)}{k_\psi \cdot v_f^*}}\right)\right)}. \quad (20)$$

Полученные формулы (7), (14) и (20) выражают отклонения от закона (5) на начальном этапе фрикционного взаимодействия. В действительности, в реальных экспериментах обнаруживаются отклонения от (5), (7) и (20) после наступления стационарного режима, которые выражаются в плавных либо скачкообразных приращениях (фрикционных переходах по

времени, переходных процессах) силы трения от одного постоянного значения к другому [1, 2].

Обобщение закона (7) на случай одного отклонения (фрикционного перехода по времени) выражается в виде суммы (7) и (20) с учётом приращений параметров в (20):

$$F_f = ((\beta_{dst} + \beta_{ast}) \cdot F_N^* + F_{fA0}) \cdot [1 - \exp(-k_\psi \cdot v_f^* \cdot t^2)] + \frac{(\Delta\beta_{dst} + \Delta\beta_{ast}) \cdot F_N^* + \Delta F_{fA0}}{1 + \exp\left(-4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (k_\psi + \Delta k_\psi) \cdot v_f^*}{e}} \cdot \left(t - \sqrt{\frac{\ln(2)}{(k_\psi + \Delta k_\psi) \cdot v_f^*}} - \Delta t_1\right)\right)}. \quad (21)$$

где  $\Delta$  – приращение параметров при фрикционном переходе по времени;  $\Delta t_1$  – длина отрезка времени  $[t_\Omega; t_{\Omega 1}]$ .

С использованием вышеизложенного формулу (21) запишем более компактно:

$$F_f = F_{fst} \cdot [1 - \exp(-k_\psi \cdot v_f^* \cdot t^2)] + \frac{\Delta F_{fst1}}{1 + \exp(-\psi_{t1} \cdot (t - t_{\Omega 1}))}. \quad (22)$$

В случае отсутствия зависимости  $\tilde{k}_{rg}$  от времени первым слагаемым в (22) будет (5) это

касается всего излагаемого ниже. Для случая одного перехода можно записать:

$$\begin{aligned}\Delta F_{fst1} &= (\Delta\beta_{dst} + \Delta\beta_{ast}) \cdot F_N^* + \Delta F_{fA0}, \\ F_{fst1} &= F_{fst} + \Delta F_{fst1} \Rightarrow \\ F_{fst1} &= (\beta_{dst} + \Delta\beta_{dst} + \beta_{ast} + \Delta\beta_{ast}) \cdot F_N^* + F_{fA0} + \Delta F_{fA0}, \\ \Psi_{t1} &= 4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (k_{\psi} + \Delta k_{\psi}) \cdot v_f^*}{e}}, \\ t_{\Omega 1} &= \sqrt{\frac{\ln(2)}{(k_{\psi} + \Delta k_{\psi}) \cdot v_f^*}} + \Delta t_1.\end{aligned}\quad (23)$$

Примеры графиков функции (22) для положительного и отрицательного приращения силы трения показаны на рис. 4.

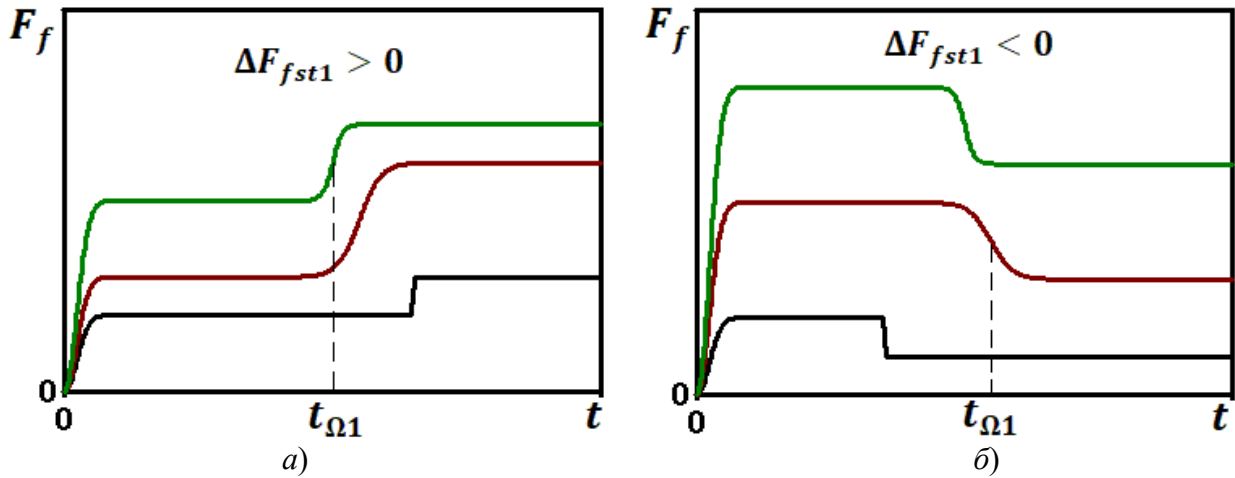


Рис. 4. Примеры графиков функции (22):

*a* – положительное приращение  $F_{fst}$ ; *б* – отрицательное приращение  $F_{fst}$

Соответственно при  $\Delta F_{fst1} = 0$  формулы (21) и (22) переходят в (7). Однако в ряде случаев в процессе реального фрикционного взаимодействия реализуется не один, но множество

фрикционных переходов по времени [1, 2, 11 – 14], обусловленных самопроизвольными изменениями состояния фрикционного контакта. Для случая нескольких фрикционных переходов формулу (21) запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned}F_f &= ((\beta_{dst} + \beta_{ast}) \cdot F_N^* + F_{fA0}) \cdot [1 - \exp(-k_{\psi} \cdot v_f^* \cdot t^2)] + \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\beta_{dst.i} + \Delta\beta_{ast.i}) \cdot F_N^* + \Delta F_{fA0.i}}{1 + \exp\left(-4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (k_{\psi} + \Delta k_{\psi.i}) \cdot v_f^*}{e}} \cdot \left(t - \sqrt{\frac{\ln(2)}{(k_{\psi} + \Delta k_{\psi.i}) \cdot v_f^*}} - \Delta t_i\right)\right)},\end{aligned}\quad (24)$$

где  $n$  – количество фрикционных переходов (переходных процессов) по времени;

$\Delta t_i$  – длина отрезка времени  $[t_{\Omega}; t_{\Omega.i}]$ . Компактная запись (24) имеет вид [1, 2]:

$$F_f = F_{fst} \cdot [1 - \exp(-k_{\psi} \cdot v_f^* \cdot t^2)] + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_{fst.i}}{1 + \exp(-\Psi_{t.i} \cdot (t - t_{\Omega.i}))}.\quad (25)$$

Пример графика функции (25) при  $n = 5$  приведён на рис. 5.

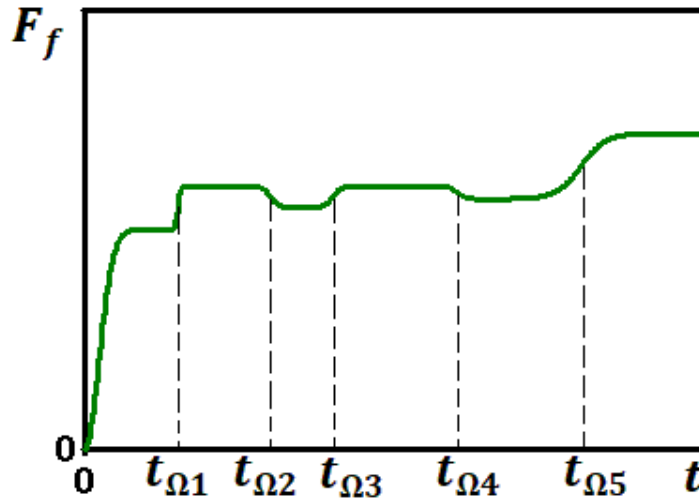


Рис. 5. Пример графика функции (25) при  $n = 5$  [2]

Установившееся (стационарное) значение силы трения после  $i$ -го фрикционного перехода по времени определяется следующим образом:

$$F_{fst.j} = F_{fst} + \sum_{i=1}^j \Delta F_{fst.i}, \quad F_{fst.0} = F_{fst}, \quad (26)$$

$$i = 1, 2, \dots, j.$$

Формула (25) хорошо согласуется со многими экспериментальными данными, однако и от неё наблюдаются отклонения (после сигмоидальных приращений), это выражается в том, что вместо постоянных параметров  $F_{fst}$  и

$\Delta F_{fst.i}$  стоят функции времени, что связано с непрерывным изменением состояния фрикционного контакта: состава, структуры, физико-механических свойств и шероховатости поверхностных слоёв. Влияние оказывает также концентрация и морфология частиц износа между трущимися телами. При наличии смазочного слоя к перечисленному добавляется изменение состава и вязкости масла, его несущей способности, окисление и т. п.

Соответственно в наиболее общем случае формула (25) имеет вид:

$$F_f = F_{fns}(t) \cdot \left[ 1 - \exp(-k_{\psi} \cdot v_f^* \cdot t^2) \right] + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_{fns.i}(t)}{1 + \exp(-\psi_{t.i} \cdot (t - t_{\Omega.i}))}, \quad (27)$$

где  $F_{fns}(t)$  – функция, выражающая изменение силы трения во времени после начального сигмоидального роста;  $\Delta F_{fns.i}(t)$  – приращения параметров функции  $F_{fns}(t)$ . Функция (24) в общем случае имеет вид:

$$F_f = \left( (\beta_d(t) + \beta_a(t)) \cdot F_N^* + F_{fA0}(t) \right) \cdot \left[ 1 - \exp(-k_{\psi} \cdot v_f^* \cdot t^2) \right] + \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\beta_d(t) + \Delta\beta_a(t)) \cdot F_N^* + \Delta F_{fA0.i}(t)}{1 + \exp \left( -4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (k_{\psi} + \Delta k_{\psi.i}) \cdot v_f^*}{e}} \cdot \left( t - \sqrt{\frac{\ln(2)}{(k_{\psi} + \Delta k_{\psi.i}) \cdot v_f^*}} - \Delta t_i \right) \right)}. \quad (28)$$

Для перехода от зависимости силы трения от времени к зависимости от пройденного

пути используем полученные аналогично (12) и (13) соотношения:

$$t = \frac{l_f}{v_f^*} \Rightarrow \psi_l = 4 \cdot \sqrt{\frac{2k_\psi}{v_f^* e}}, \quad l_{f\Omega} = \sqrt{\frac{v_f^* \ln(2)}{k_\psi}}, \quad (29)$$

где  $\psi_l$  – резкость фрикционного перехода от одного режима трения к другому (по пути);  $l_{f\Omega}$  – величина пути трения, соответствующая

максимальной интенсивности изменения силы трения. В этом случае (27) и (28) приобретают вид:

$$F_f = \tilde{F}_{fns}(l_f) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_\psi}{v_f^*} \cdot l_f^2\right) \right] + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \tilde{F}_{fns.i}(l_f)}{1 + \exp\left(-\psi_{l.i} \cdot (l_f - l_{f\Omega.i})\right)},$$

$$F_f = \left( (\tilde{\beta}_d(l_f) + \tilde{\beta}_a(l_f)) \cdot F_N^* + \tilde{F}_{fA0}(l_f) \right) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_\psi}{v_f^*} \cdot l_f^2\right) \right] +$$

$$+ \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta \tilde{\beta}_d(l_f) + \Delta \tilde{\beta}_a(l_f)) \cdot F_N^* + \Delta \tilde{F}_{fA0.i}(l_f)}{1 + \exp\left(-4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (k_\psi + \Delta k_{\psi.i})}{v_f^* \cdot e}} \cdot \left( l_f - \sqrt{\frac{v_f^* \cdot \ln(2)}{k_\psi + \Delta k_{\psi.i}}} - \Delta l_{fi} \right)\right)}.$$

Чаще всего (25) выполняется при анализе опытных данных [1, 2], в ряде случаев оно выполняется частично с отклонениями (после сигмоидальных приращений) только на некоторых отрезках времени или пути [1, 2]. Отклонения от (25) могут иметь как нелинейный, так и линейный характер. Чаще можно встретить

линейные отклонения, а также нелинейные, которые хорошо приближаются линейными функциями. Примеры графиков зависимостей силы трения от времени (пути) с линейными и нелинейными отклонениями приведены на рис. 6.

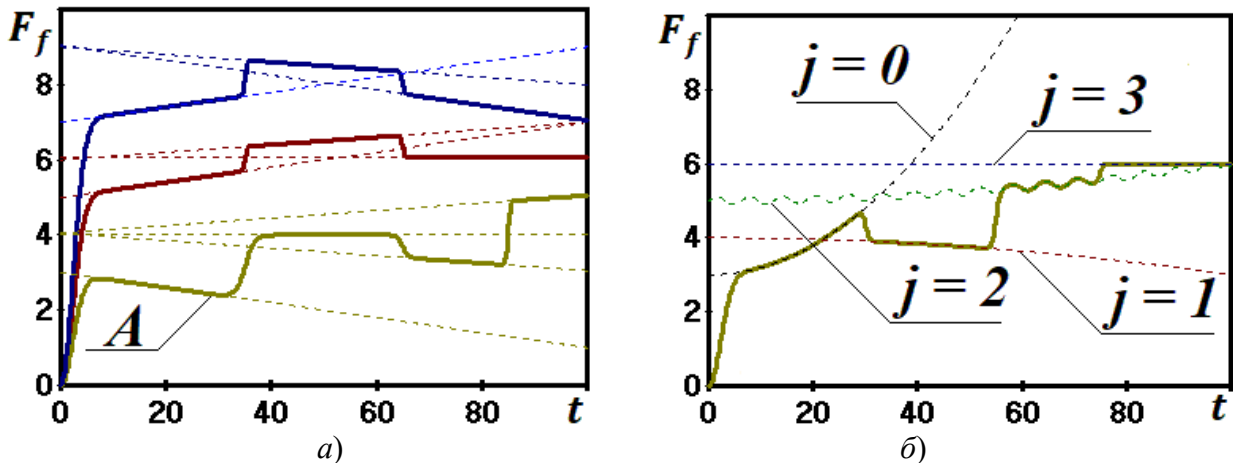


Рис. 6. Примеры графиков функции (27):

$a$  –  $F_{fns}(t)$  и  $\Delta F_{fns.i}(t)$  линейные функции;  $b$  –  $F_{fns}(t)$  и  $\Delta F_{fns.i}(t)$  нелинейные функции

Неустановившееся (нестационарное) значение силы трения после  $i$ -го фрикционного

перехода по времени (также и по пути) определяется аналогично (26):

$$F_{fns.j}(t) = F_{fns}(t) + \sum_{i=1}^j \Delta F_{fns.i}(t), \quad F_{fns.0}(t) = F_{fns}(t),$$

$$i = 1, 2, \dots, j. \quad (31)$$

Функции (26) являются частными случаями (31). В качестве примера приведём выражение для функции, отражающей линейные

изменения силы трения после сигмоидальных переходов, график которой обозначен буквой «А» (рис. 6, а):

$$F_f = (3 - 0,02t) \cdot (1 - \exp(-0,1t^2)) + \frac{1 + 0,02t}{1 + \exp(-1,1(t - 35))} + \frac{0,05 - 0,01t}{1 + \exp(-2(t - 65))} + \frac{0,02t}{1 + \exp(-5(t - 85))}. \quad (32)$$

Из рис. 6, а и (32) легко видеть, что функции (31) линейны (пунктирные прямые на рис. 6, а) и совпадают с соответствующими им участками линейного изменения силы трения

после самопроизвольных изменений состояния фрикционного контакта.

Функция, график которой изображён на рис. 6, б, имеет следующий вид:

$$F_f = (0,002t^2 + 3) \cdot (1 - \exp(-0,1t^2)) + \frac{1 - 0,0021t^2}{1 + \exp(-3(t - 30))} + \frac{1 + 0,0002t^2 + 0,1 \sin(t)}{1 + \exp(-3(t - 55))} + \frac{1 - 0,0001t^2 - 0,1 \sin(t)}{1 + \exp(-3(t - 75))}. \quad (33)$$

Из рис. 6, б и (33) видно, что функции (31) нелинейные (пунктирные кривые на рис. 6, б), за исключением  $j = 3$  и совпадают с соответствующими им участками нелинейного изменения силы трения. Зависимость (33) не встречалась в экспериментальных исследованиях, но приведена в качестве примера того, что даже весьма сложные зависимости силы трения от времени (пути), которые встречаются в опыте (а таковые есть и могут появляться), вполне могут быть аналитически описаны.

В наших исследованиях наиболее часто встречаются зависимости типа (25), которые выражают изменения состояния фрикционного контакта и последующего сохранения на некоторый интервал времени нового его состояния [1, 2]. Несколько реже встречаются зависимости типа (27) (соответственно и (30)) с линейными функциями при первом слагаемом и в числителях суммируемых дробей, которые выражают интенсивные (сигмоидальные) изменения состояния фрикционного контакта и следующие за ними линейные изменения (с постоянной интенсивностью), что можно характеризовать как приспособляемость пары трения [1, 2]. Зависимости типа (27) включающие нелинейные функции (31) встречаются ещё реже, но в силу высокой сложности процесса трения, о которой говорится в большинстве публикаций данной тематики, их также необходимо

использовать для описания фрикционного взаимодействия.

Формулы (27) и (28) выражают эмпирический закон изменения силы внешнего трения скольжения во времени при самопроизвольных изменениях состояния фрикционного контакта. Формулы (30) выражает данный закон от пути трения.

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Реализован анализ, уточнение и обобщение существующей эмпирической математической модели изменения силы трения от времени на случаи самопроизвольных изменений состояния фрикционного контакта твёрдых тел, что позволяет получать аналитические представления весьма сложных экспериментальных зависимостей.

2. С использованием адгезионно-деформационной теории трения построена феноменологическая модель зависимости силы трения от времени и пути, учитывающая самопроизвольные изменения состояния фрикционного контакта, что позволяет реализовывать интерпретацию эмпирических параметров и характеристик с молекулярно-механической точки зрения.

3. Показано, что функции (31), выражающие изменение силы трения после фрикционных переходов, самостоятельно аппроксимируют соответствующие им участки графика

силы трения от времени и пути, что позволяет при поэтапном анализе процесса рассматривать не всю полученную зависимость в целом, а отдельные её компоненты.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бреки А.Д.** Триботехнические характеристики материалов пар трения и смазочных сред в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»]. Санкт-Петербург, 2021. 378 с.

2. **Бреки А.Д.** Триботехнические характеристики материалов пар трения и смазочных сред в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич; [Место защиты: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого]. Санкт-Петербург, 2021. 43 с.

3. **Бартенев Г. М.** Трение и износ полимеров [Текст] / Г. М. Бартенев, В. В. Лаврентьев. - Ленинград: Химия. Ленингр. отд-ние, 1972. 240 с.

4. **Кузнецов В.Д.** Физика твердого тела / В.Д. Кузнецов. - Изд. 2-е, заново перераб. - Томск: Красное знамя, 1937 – 1949. Т. 4: Материалы по физике внешнего трения, износа и внутреннего трения твердых тел. – Изд-во Полиграфиздата, 1947. 542 с.

5. **Труды Третьей Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах** [Текст]: [В 3 т.] / Акад. наук СССР. Ин-т машиноведения. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. 3т.; Т. 2: Сухое и граничное трение. Т.2: Фрикционные материалы / [Отв. ред. д-р техн. наук проф. И.В. Крагельский]. 1960. 303 с.

6. **Трение и износ при резании металлов** [Текст]: [Сборник статей] / Под общ. ред. акад. В.И. Дикишина; Акад. наук СССР. Ин-т машиноведения. Комис. по технологии машиностроения. М.: Машгиз, 1955. 143 с.

7. **Крагельский И.В.** Трение и износ [Текст]. - 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

8. **Крагельский И.В., Щедров В.С.** Развитие науки о трении [Текст]: Сухое трение / Акад. наук СССР. Ин-т машиноведения. М.: Изд-во Акад. Наук СССР, 1956. 235 с.

9. **Сухое трение** [Текст]: Сборник трудов Совещания по вопросам теории сухого трения и образования частиц износа при сухом трении. [24 – 26 ноября 1959 г. г. Рига] / Под ред. С.Б. Айнбиндера; Акад. наук Латв. ССР. Ин-т автоматики и механики. Рига: Изд-во Акад. наук Латв. ССР, 1961. 204 с.

10. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Основы расчетов на трение и износ [Текст]. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

11. **Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Колмаков А.Г. и др.** Математические закономерности изменения характеристик процесса трения пористого композиционного материала на основе меди, содержащего масло с частицами графена // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22. № 1 (77). С. 390–402.

12. **Breki A.D. Aleksandrov S.E Tyurikov K.S.** Anti-friction Properties of Plasma-Chemical Coatings Based on SiO<sub>2</sub> with MoS<sub>2</sub> Nanoparticles under Conditions of Spinning Friction on ShKh15 Steel // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9. no 4. P. 714–718.

13. **Бреки А.Д.** Влияние микроскопических грибов *Aspergillus niger* на триботехнические свойства пластичного смазочного материала марки "ЛИТА" / А. Д. Бреки, С. А. Семенов, Н. Е. Стариков [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 108–117.

14. **Бреки А.Д., Тюрикова И.А., Шатульский А.А. и др.** Влияние магнитных наночастиц Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> на трение и износ стали 10X17H13M2T в режиме верчения в среде смазочного масла // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2018. № 4 (47). С. 103–111.

15. **Кудинов В.А.** Динамика станков [Текст]. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.

## REFERENCES

1. Breki A.D. Tribotechnicheskie karakteris-tiki materialov par treniya i smazochnikh sred v usloviyakh samoproduzvolnikh izmene-nii sostoyanii friktsionnogo kontakta Dis. dokt. tech. nauk [Tribotechnical materials characterization for frictional couples and lubricating mediums under conditions of spontaneous changes in frictional contact states. D. Sc. Thesis, 05.02.04]. Breki Alexander Dzhalyulevich; [Place of defense: St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great], St. Petersburg, 2021, 378 p. (in Russian).

2. Breki A.D. Tribotechnicheskie karakteris-tiki materialov par treniya i smazochnikh sred v usloviyakh samoproduzvolnikh izmene-nii sostoyanii friktsionnogo kontakta Dis. dokt. tech. nauk [Tribotechnical materials characterization for frictional couples and lubricating mediums under conditions of spontaneous changes in frictional contact states. Extended Abstract of D. Sc. Thesis, 05.02.04]. Breki Alexander Dzhalyulevich; [Place of defense: St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great], St. Petersburg, 2021, 43 p. (in Russian).

3. Bartenev G. M. Trenie i iznos polimerov [Friction and wear of polymers] [Text]. G. M. Bartenev, V. V. Lavrentiev. Leningrad: Himiya. Leningr. otd-nie, 1972. 240 p. (in Russian).

4. Kuznetsov V.D. Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]. V.D. Kuznetsov, 2-nd ed., re-edited. - Tomsk: Krasnoe znamya, 1937-1949, Vol. 4: Materials on the physics of external friction, wear and internal friction of solids. – Publishing house of Polygraphizdat, 1947, 542 p. (in Russian).

5. Trudi 3 Vsesoyuznoy nauchnoy konferentsii po treniyu i iznosu v mashinah [Proceedings of the Third All-Union Conference on Friction and Wear in Machines] [Text]: [In 3 volumes] / Academy of Sciences of the USSR. Institute of Machine Science. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1960, vol. 3, vol. 2: Dry and boundary friction. Vol.2: Friction materials. [Editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences Prof. I.V. Kragelsky], 1960, 303 p. (in Russian).

6. Friction and wear when cutting metals [Text]: [Collection of articles] / Under the general edition of Dikushin V. I., a member of the Academy of Sciences of the USSR. Academy of Sciences of the USSR, Institute of Machine Science, Mechanical-engineering technology committee. Moscow: Mashgiz, 1955, 143 p.

7. Kragelsky I.V. Trenie i iznos [Friction and wear] [Text]. - 2nd ed., revised edition. Moscow: Mashinostroenie, 1968. 480 p. (in Russian).

8. Kragelsky I.V., Shchedrov, V.S. Razvitie nauki o trenii [The development of friction science] [Text]: Dry friction. Academy of Sciences of the USSR. Institute of Machine Science. Moscow: Publishing House of Academy of Sciences of the USSR, 1956, 235 p. (in Russian).

9. Suhoe trenie [Текст] Sbornik trudov soveshaniya po voprosam teorii suhogo treniya i obrazovaniya chastits. Dry friction [Text]: Proceedings of the Meeting on the Theory of dry friction and the formation of wear particles in dry friction process. [November 24-26, 1959, Riga]. Edited by S.B. Einbinder; Academy of Sciences of the Latvian SSR. Automation and Mechanics Institute. Riga: Publishing House of the Academy of Sciences of Latvian USSR, 1961, 204 p. (in Russian).

10. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov, V.S. Osnovi raschetov na trenie i iznos [Fundamentals of

calculations for friction and wear] [Text]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p. (in Russian).

11. Breki A.D., Chulkin S.G., Kolmakov A.G., et.al. Mathematical laws of changes in the characteristics of the friction process of a porous composite material based on copper containing oil with graphene particles. *Chebyshevskii Sbornik*, 2021; vol. 22 no. 1(77), pp. 390–402. (in Russian)

12. Breki A.D. Aleksandrov S.E. Tyurikov K.S. Antifriction Properties of Plasma-Chemical Coatings Based on SiO<sub>2</sub> with MoS<sub>2</sub> Nanoparticles under Conditions of Spinning Friction on ShKh15 Steel // *In-organic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9. No 4. P. 714–718.

13. Breki A.D. Influence of microscopic *Aspergillus niger* fungi on tribotechnical properties of LITA brand plastic lubricant. A.D. Breki, S. A. Semenov, N. E. Starikov [et al.]. *Izvestiya Tula state University. Technical science.*, 2018, no. 7, pp. 108–117.

14. Breki A.D., Tyurikova I.A., Shatul'sky A.A., et.al. The effect of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles on the friction and wear of 10X17H13M2T steel in the spinning mode in a lubricating oil media. *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov*, 2018, no. 4 (47). pp. 103–111.

15. Kudinov V.A. Dinamika stankov [Dynamics of machining facilities]. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 01.02.2023; одобрена после рецензирования 07.02.2023; принята к публикации 03.02.2023.

The article was submitted 01.02.2023; approved after reviewing 07.02.2023; accepted for publication 03.02.2023.

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 17.03.2023. Выход в свет 28.03.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

12+

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16