

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

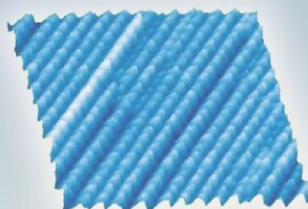
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2 (140)
2023

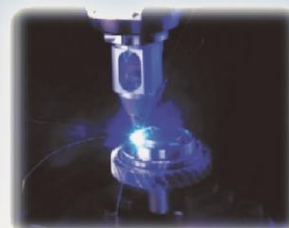
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



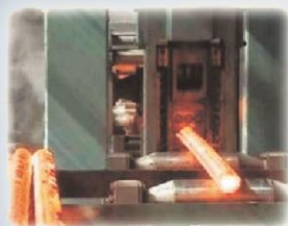
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



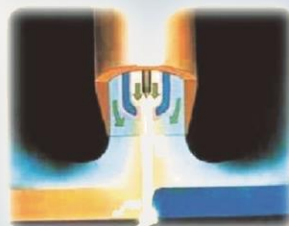
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



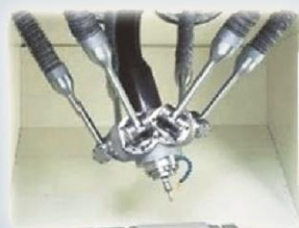
**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 2 (140)

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Валеева М.Е., Кондратьева Л.А. Получение силана в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из кремнийсодержащего сырья с использованием азидата натрия и галогенидов алюминия. 3

ТЕХНОЛОГИИ

МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Оценка величины упругой разгрузки при маятниковом поверхностном пластическом деформировании. 8

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Волковский А.А., Макаров В.Ф. Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна. 15

Унянин А.Н., Димухаметов И.З. Моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната при различных режимах обработки. 26

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

Бреки А.Д. Обобщенный закон внешнего трения скольжения твердых тел 32

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕМОНТЕ, ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Горленко А.О., Шохийн А.Н., Щербак А.Н. Технологические методы продления долговечности цилиндрических поверхностей трения. 40

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

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 2 (140)

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. RAS LYSAK 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. SHOHNYON A.N. (Kulob,
Tajikistan)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Subscription index: **379195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

**The journal is registered by the Federal
service for supervision of communications,
information technologies and mass
communications (Roskomnadzor)**

26.04.2019 registration number

print publication № FS77-75524

CONTENTS

MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Valyaeva M.E., Kondratieva L.A. Obtaining sialon from silicon-containing raw materials in the mode of self-propagating high-temperature synthesis using sodium azide and aluminum halogenides. 3

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Zaides S.A., Ho Minh Quan. Value elasticity estimation in pendulum surface plastic deformation. 8

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES NONMETALLIC PARTS PRODUCTION

Volkovsky A.A., Makarov V.F. Comparative quality analysis for treated surface in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials based on carbon fiber. 15

Unyanin A.N., Dimukhametov I.Z. Modeling of technological parameters in the milling process of polycarbonate workpieces under various processing modes. 26

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

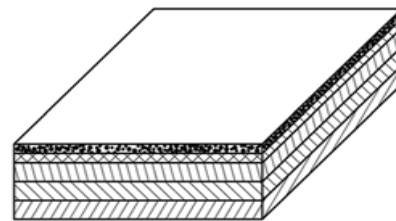
Breki A.D. Generalized law of contact gliding friction of solids. 32

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN COATING, PARTS REPAIR AND RECOVERY

Gorlenko A.O., Shohnyon A.N., Shcherbakov A.N. Technological methods for durability extending of cylindrical friction surfaces. 40

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №2 (140). С. 3-7.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №2 (140). P. 3-7.

Научная статья

УДК 666.775-798.2

doi:10.30987/2223-4608-2023-2-3-7

Получение сиалона в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из кремнийсодержащего сырья с использованием азидов натрия и галогенидов алюминия

Мария Евгеньевна Валяева¹, аспирант,

Людмила Александровна Кондратьева², д.т.н.

^{1, 2} Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

¹valiaeva.maria@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0000-0000>

²schiglou@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3940-9511>

Аннотация. Рассмотрена возможность получения сиалона в режиме СВС-Аз из систем «диоксид кремния – азид натрия – галогенид алюминия – кремний». Исследован фазовый состав, структура продуктов горения и определен средний размер частиц. Установлено, что частицы продукта в процессе горения объединялись в агломераты. Средний размер пластинчатых частиц составил 300...350 нм, а равноосных – 120...170 нм.

Ключевые слова: сиалон, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, песок, диоксид кремния, азид натрия

Для цитирования: Валяева М. Е., Кондратьева Л. А. Получение сиалона в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из кремнийсодержащего сырья с использованием азидов натрия и галогенидов алюминия // Научноёмкие технологии в машиностроении – 2023. – № 2 (140). – С. 3-7. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-3-7.

Original article

Obtaining sialon from silicon-containing raw materials in the mode of self-propagating high-temperature synthesis using sodium azide and aluminum halogenides

Maria E. Valyaeva¹, postgraduate student,

Lyudmila A. Kondratieva², Dr.Sc.Tech.

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

¹valiaeva.maria@yandex.ru, ²schiglou@yandex.ru

Abstract. The possibility of obtaining sialon in the SHS-Az mode (self-propagating high-temperature synthesis using sodium azide) from the systems «silicon dioxide – sodium azide – aluminum halogenide – silicon» is viewed. The phase composition and combustion products are analyzed and the average particle size is determined. It was found that particles of a combustion product were combined into agglomerates. The average size of plate-like particles was 300...350 nm, and equiaxed particles – 120...170 nm.

Keywords: sialon, self-propagating high-temperature synthesis, sand, silicon dioxide, sodium azide

For citation: Valyaeva M.E., Kondratieva L.A. Obtaining sialon from silicon-containing raw materials in the mode of self-propagating high-temperature synthesis using sodium azide and aluminum halogenides. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 3-7. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-3-7.

Введение

Сиалон или оксинитрид алюминия-кремния (SiAlON) – это высокотемпературный керамический материал на основе четвертных

фаз системы Si-Al-O-N. Его изображают в виде тетраэдра, в вершинах которого находятся Si, Al, O и N [1].

В основе структуры сиалона лежит Si_3N_4 , в

котором Si^{4+} замещен на Al^{3+} , а N^{3-} на O^{2-} . Физические и механические свойства близки к Si_3N_4 , а химические – к Al_2O_3 . Различают до 10 типов сиалонов, обладающих развитой кристаллической структурой. Основными и широко применяемыми являются α -, β - и O' -сиалоны.

α -сиалон характеризуется высокой твердостью и хорошей термостойкостью. β -сиалон обладает высокой прочностью и ударной вязкостью. Материалы на основе α - и α/β -сиалонов имеют хорошую устойчивость к коррозии в щелочах. У O' -сиалона наилучшие окислительные свойства по сравнению с α - и β -сиалонами, связано это с тем, что в O' -сиалоне высокое содержание кислорода.

В зависимости от применяемых добавок, материалы на основе сиалонов используются не только в качестве высокотемпературной конструкционной керамики (режущие инструменты), но и в качестве люминофоров в белых светодиодах. Также материалы на основе сиалонов применяют в качестве: фильтрующей мембраны – для очищения вод в нефтяной и химической промышленности; буферного слоя – для повышения адгезии в тонких пленках, биокерамики и для обработки металлов.

Самыми распространенными методами получения сиалоновой керамики являются методы горячего прессования и искрового плазменного спекания. Однако эти методы имеют один большой недостаток, они используют жаропрочные дорогостоящие графитовые пресс-формы, которые быстро изнашиваются. Кроме этого, при горячем прессовании используется высокое давление.

Согласно литературным источникам [2 – 4], сиалон можно получать методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Данный метод использует высокоэкзотермические реакции твердого пламени между компонентами порошка путем контролируемого высокотемпературного горения. С помощью электронагреваемого элемента или химической реакции происходит инициирование горения. Далее, горение распространяется благодаря самоподдерживающейся волне горения. Материал, перед распространяющейся волной, предварительно нагревается теплом, генерируемым горением, а материал за фронтом горения быстро охлаждается, когда волна быстро уходит от него и угасает. Главное требование метода СВС – экзотермичность реак-

ции взаимодействия исходных порошков.

СВС сиалонов основан на фильтрационном сжигании реакционноспособных смесей, содержащих порошки Al , Si и их оксиды Al_2O_3 , SiO_2 , в газообразном азоте или воздухе. Газообразный реагент достигает зоны реакции горения, проникая через поры между частицами твердого реагента, благодаря градиенту давления, присутствующему между реакционной зоной и окружающей средой. Азотирование в фильтрационном режиме горения возможно только при минимальном давлении азота 30 МПа. Значения максимальных температур (2400...2600 К) во фронте горения и скоростей (0,9...1,6 мм/с) его распространения очень высоки [5].

В настоящее время получение сиалоновой керамики методом СВС весьма актуально. Например, иранскими учеными исследован новый метод СВС-процесса синтеза сиалона при низком давлении азота. Реагентами являлась гелевая смесь из кремнезема, оксида натрия (силикат натрия) и порошка алюминия. В качестве воспламенителей использовали мочевины и гидрат нитрата алюминия. Порошок $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ выступал в качестве разбавителя снижая адиабатическую температуру и способствуя диффузии азота в расплавленные реагенты, чтобы те не спекались. Хлорид аммония NH_4Cl использовался в качестве катализатора, а также добавлялся Mg . Реагенты смешивались и в виде свободной засыпки (не прессовались) укладывались в полость камеры сгорания. Давление азота в камере сгорания поддерживалось постоянным – около 0,1 МПа. Продукт синтеза представлял собой агломераты α -, β - и O' -сиалона [6].

Японские и китайские ученые опубликовали работу [7] о синтезе порошков β -сиалона методом горения, где в качестве разбавителя выступал NaCl , выполняющий также роль поглотителя тепла, выделяемого реакцией горения. Реакционная шихта состояла из порошков Si , SiO_2 , Al и NaCl . Порошки реагентов механически активировали планетарным шаровым измельчением с использованием циркониевых шариков в циркониевом горшке. Активированную смесь загружали в цилиндрический углеродный тигель с вентиляционными отверстиями, через которые подавался в зону реакции газообразный азот. Реакцию горения проводили при давлении азота 1 МПа путем пропуска тока 60 А в течение 10 сек.

Также в 2016 г. китайские ученые синтезировали β -сиалон методом горения. Сырьем для получения сиалона являлись порошки Si_3N_4 , AlN , SiO_2 , Al_2O_3 и Al . Исходные реагенты перемешивали в мельнице в течение двух часов. Далее порошки спрессовывали в гранулы и помещали в графитовых тиглях в камеру сгорания. Реакционную камеру вакуумировали и заполняли азотом до 10 МПа. Затем порошковая смесь воспламенялась вольфрамовой катушкой при пропускании электрического тока. Температура регистрировалась при помощи термопары. По окончании реакции образцы быстро охлаждались со скоростью охлаждения $60^\circ\text{C}/\text{сек}$. Таким методом был получен продукт – β -сиалон [8].

В работе [9] японскими учеными совместно с учеными из Египта был предложен метод горения для получения однофазно-сиалоновых порошков с однородными составами. Сырье Si , SiO_2 и Al сжигалось при давлении азота 1 МПа. В качестве разбавителя добавлялся сиалон до 50 % масс., благодаря которому значительно снижались как температуры реакции, так и количество остаточных кремния и алюминия [10].

Материалы и методы исследований

Исходными реагентами при проведении исследований по получению сиалона из систем « $2\text{SiO}_2\text{-6NaN}_3\text{-3AlF}_3\text{-Si}$ » и « $2\text{SiO}_2\text{-9NaN}_3\text{-3Na}_3\text{AlF}_6\text{-Si}$ » по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза был песок (диоксид кремния) (с содержанием основного вещества SiO_2 – 97,2 % масс.), фторид алюминия (соль в виде кристаллов белого цвета с содержанием основного вещества AlF_3 – 99,1 % масс.) или гексафторалюминат натрия (соль в виде кристаллов белого цвета с содержанием основного вещества Na_3AlF_6 – 99,0 % масс.), азид натрия (белые гексагональные кристаллы с содержанием основного вещества NaN_3 – 98,7 % масс.) и кремний (сферический порошок светло-серого цвета с содержанием основного вещества Si – 99,1 % масс.)

Получение сиалона в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из кремнийсодержащего сырья с использованием азиды натрия и галогенидов алюминия осуществлялось в лабораторном реакторе СВС-Аз (рис. 1).

Исходными условиями синтеза сиалона были: плотность реакционной шихты – относительная ($\delta = 0,34$), диаметр экспериментального

образца – 3 см, давление газообразного азота в лабораторном реакторе СВС-Аз – 4 МПа.

Технологический процесс синтеза сиалона состоял в следующем: реагенты исходной шихты взвешивались и перемешивались в фарфоровой ступке, затем шихта ссыпалась в заранее приготовленный стаканчик из кальки – получался образец. Образец размещался на предметной полочке лабораторного реактора СВС-Аз. Для измерения температуры горения в образце вводили вольфрам-рениевые термопары. Реактор вакуумировался, промывался рабочий газом (N_2), повторно вакуумировался и заполнялся газообразным азотом до 4 МПа. Поджигание шихты осуществлялось с помощью вольфрамовой спирали, на которую подавалось напряжение. Шихта воспламенялась и по образцу проходил фронт горения, происходил процесс СВ-синтеза продукта. После синтеза продукт горения выдерживался в реакторе без сброса давления в течение 15...20 мин. По истечении времени сбрасывалось давление и образец извлекался из реактора. Сушка продукта после промывки водой и фильтрации на воронке Бюхнера проводилась на открытом воздухе.



Рис. 1. Лабораторная установка для синтеза продуктов в режиме СВС-Аз

Экспериментальный образец исследовался с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6390А с целью определения морфологии и размера частиц продукта, а также с помощью дифрактометра ARL X'tra-138 с целью определения фазового состава конечного продукта.

Результаты исследования

Результаты рентгенофазового анализа продуктов горения представлены на рис. 2 и 3.

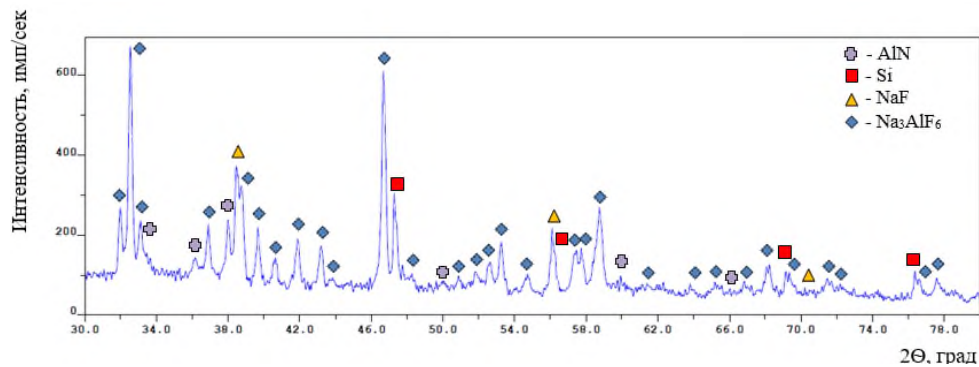


Рис. 2. Рентгенограмма продукта горения системы « $2\text{SiO}_2-6\text{NaN}_3-3\text{AlF}_3-\text{Si}$ »

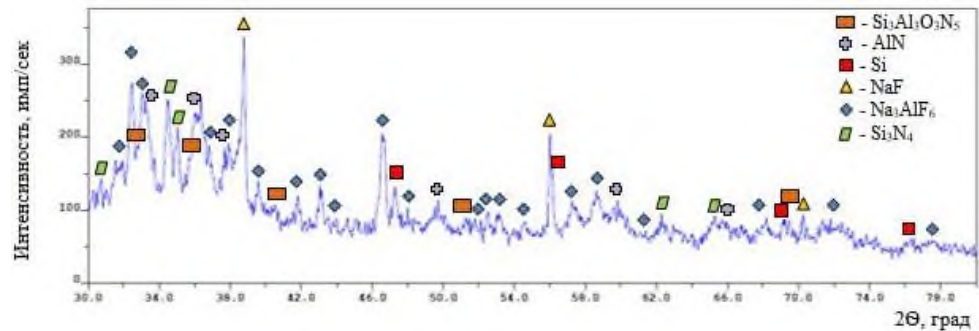
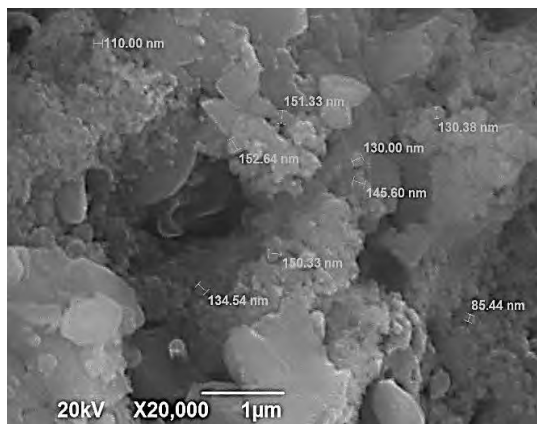


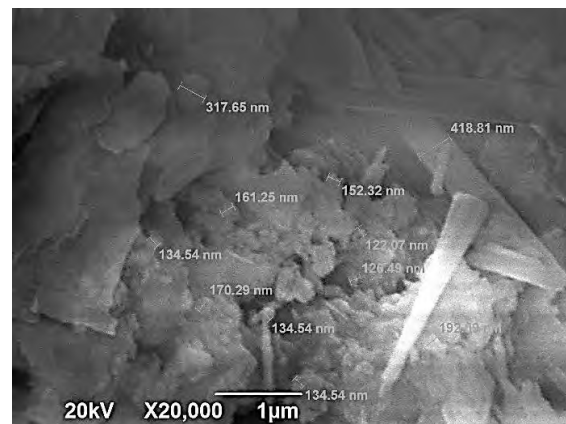
Рис. 3. Рентгенограмма продукта горения системы « $2\text{SiO}_2-9\text{NaN}_3-3\text{Na}_3\text{AlF}_6-\text{Si}$ »

Результаты анализов по морфологии и размеру частиц продукта, полученного при горении СВС-систем « $2\text{SiO}_2-6\text{NaN}_3-3\text{AlF}_3-\text{Si}$ » и

« $2\text{SiO}_2-9\text{NaN}_3-3\text{Na}_3\text{AlF}_6-\text{Si}$ » представлены на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Морфология и размер частиц продукта, полученного по технологии СВС-Аз из систем:
а – « $2\text{SiO}_2-6\text{NaN}_3-3\text{AlF}_3-\text{Si}$ »; б – « $2\text{SiO}_2-9\text{NaN}_3-3\text{Na}_3\text{AlF}_6-\text{Si}$ »

Обсуждение результатов исследования

Результаты исследования фазового состава продукта, полученного из систем « $2\text{SiO}_2-6\text{NaN}_3-3\text{AlF}_3-\text{Si}$ » и « $2\text{SiO}_2-6\text{NaN}_3-3\text{AlF}_3-\text{Si}$ », говорят о многофазовом составе конечного продукта (см. рис. 2 и 3).

Продукт исследования, полученный из системы « $2\text{SiO}_2-6\text{NaN}_3-3\text{AlF}_3-\text{Si}$ », представлял собой смесь из частиц нескольких фаз при соотношении: AlN (16 %) < Si (18 %) < NaF (23 %) <

Na_3AlF_6 (43 %), что видно из рис. 2. Фазы сиалона в результатах исследования продукта на рентгенограмме отсутствуют.

Продукт исследования, полученный из системы « $2\text{SiO}_2-9\text{NaN}_3-3\text{Na}_3\text{AlF}_6-\text{Si}$ », представлял собой смесь из частиц нескольких фаз при соотношении: Si_3N_4 (8 %) < β -сиалон $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$ (12 %) < AlN (15 %) < Si (18 %) < NaF (19 %) < Na_3AlF_6 (28 %), что видно из рис. 3.

Результаты исследования морфологии продукта показали, что частицы в конечном продукте объединены в агломераты (см. рис. 4). Средний размер отдельных частиц продукта, полученного из системы « $2\text{SiO}_2\text{-}6\text{NaN}_3\text{-}3\text{AlF}_3\text{-Si}$ », составил 80...120 нм. Форма частиц равноосная с большой развитой поверхностью. Морфология частиц продукта, полученного из системы « $2\text{SiO}_2\text{-}9\text{NaN}_3\text{-}3\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Si}$ », имела форму пластин и равноосных частиц. В зависимости от морфологии, частицы имели разный размер: средний размер пластинчатых частиц – 300...350 нм, средний размер равноосных частиц – 120...170 нм.

Заключение

Т.о, на основании экспериментальных результатов по синтезу продукта в режиме горения методом CBC-Аз из систем « $2\text{SiO}_2\text{-}6\text{NaN}_3\text{-}3\text{AlF}_3\text{-Si}$ » и « $2\text{SiO}_2\text{-}6\text{NaN}_3\text{-}3\text{AlF}_3\text{-Si}$ », можно утверждать, что использование песка, в качестве исходного компонента и источника SiO_2 , позволяет получить в составе конечных синтезированных продуктов фазу сиалона. Было установлено, что в режиме горения CBC-систем сиалон состава $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$ был получен при горении системы « $2\text{SiO}_2\text{-}9\text{NaN}_3\text{-}3\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Si}$ ». Однако, целевой продукт синтеза состоял не только из частиц $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$, кроме них в составе продукта были обнаружены частицы AlN , NaF , Si_3N_4 , Na_3AlF_6 и Si . Из системы « $2\text{SiO}_2\text{-}6\text{NaN}_3\text{-}3\text{AlF}_3\text{-Si}$ » методом CBC-Аз получить сиалон не удалось.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьев О.Н., Дубовик Т.В., Винокуров В.Б., Котенко В.А., Бега Н.Д., Субботин В.И., Клименко Л.И. Горячепрессованный сиалон - перспективный материал для создания слоистых ударопрочных композитов // Огнеупоры и техническая керамика. 2007. С. 10 –14.
2. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика / Сборник научных статей под ред. Е. А. Сычева. Черноголовка: Территория, 2001. 432 с.
3. Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. 336 с.
4. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2008. Vol. 17(4). P. 242–265.
5. Xanthopoulou G., Vekinis G. An overview of some

environmental applications of self-propagating high-temperature synthesis // Advances in Environmental Research. 2001. № 5 (2001). P. 117–128.

6. Kheirandish A.R., Nekouee Kh.A., Khosroshahi R.A., Ehsani N. Self-propagating high temperature synthesis of SiAlON // Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2015. № 55 (2015). P. 68–79.

7. Niu J., Yi X., Nakatsugawa I., Akiyama T. Salt-assisted combustion synthesis of β -SiAlON fine powders // Intermetallics. 2013. № 35 (2013). P. 53–59.

8. Li Z., Wang Z., Zhu Mengguang, Li Jinfu, Zhang Zuotai. Oxidation behavior of β -SiAlON powders fabricated by combustion synthesis // Ceramics International. 2016. № 42 (2016). P. 7290–7299.

9. Shahien M., Radwan M., Kirihaara S., Miyamoto Y., Sakurai T. Combustion synthesis of single-phase -sialons ($z = 2\text{-}4$) // Journal of the European Ceramic Society. 2010. № 30 (2010). P. 1925–1930.

10. Валяева М.Е., Кондратьева Л.А. Обзор методов получения сиалона // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 4(37). С. 10–16.

REFERENCES

1. Grigoriev, O.N., Dubovik, T.V., Vinokurov, V.B., Kotenko, V.A., Bega, N.D., Subbotin, V.I., Klimenko, L.I. Hot-pressed sialon - a promising material for creating layered impact-resistant composites // Refractories and technical ceramics, 2007, PP. 10-14.

2. Self-propagating high-temperature synthesis: theory and practice / Collection of scientific articles edited by E.A. Sychev. – Chernogolovka: Territory, 2001, 432 p.

3. Merzhanov, A.G., Mukasyan, A.S. Solid flame gorenje. – M.: TORUS PRESS, 2007, 336 p.

4. Merzhanov, A.G. Borovinskaya, I.P. Historical retrospective of SHS: An autoreview // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 2008, №17 (4), P. 242-265.

5. Xanthopoulou, G., Vekinis, G. An overview of some environmental applications of self-propagating high-temperature synthesis // Advances in Environmental Research, 2001, №5 (2001), P. 117-128.

6. Kheirandish, A.R., Nekouee, Kh.A., Khosroshahi, R.A., Ehsani, N. Self-propagating high temperature synthesis of SiAlON // Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, №55 (2015), P. 68-79.

7. Niu, J., Yi, X., Nakatsugawa, I., Akiyama, T. Salt-assisted combustion synthesis of β -SiAlON fine powders // Intermetallics, 2013, №35 (2013), P. 53-59.

8. Li, Z., Wang, Z., Zhu, Mengguang, Li, Jinfu, Zhang, Zuotai. Oxidation behavior of β -SiAlON powders fabricated by combustion synthesis // Ceramics International, 2016, №42 (2016), P. 7290-7299.

9. Shahien, M., Radwan, M., Kirihaara, S., Miyamoto, Y., Sakurai, T. Combustion synthesis of single-phase -sialons ($z = 2\text{-}4$) // Journal of the European Ceramic Society, 2010, №30 (2010), P. 1925-1930.

10. Valyaeva M.E., Kondratieva, L.A. Review of methods for obtaining sialon // Modern materials, equipment and technologies, 2021, № 4(37), PP. 10-16.

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

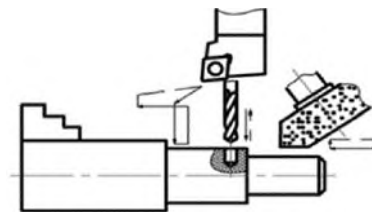
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2022; одобрена после рецензирования 19.12.2022; принята к публикации 26.12.2022.

The article was submitted 22.11.2022; approved after reviewing 19.12.2022; assepted for publication 26.12.2022.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №2 (140). С. 8-14.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №2 (140). P. 8-14.

Научная статья
УДК 621.787.4
doi:10.30987/2223-4608-2023-2-8-14

Оценка величины упругой разгрузки при маятниковом поверхностном пластическом деформировании

Семен Азикович Зайдес¹, д.т.н.,
Минь Куан Хо², аспирант

^{1, 2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

¹ zsa@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-7750-7497>

² minhquanho2605@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0488-0290>

Аннотация. Определена упругая разгрузка упрочненного слоя при маятниковом поверхностном пластическом деформировании. Приведены расчеты с помощью компьютерного моделирования Ansys 19.1 по определению влияния основных технологических параметров и режимов маятникового ППД на величину подъема металла, которая позволяет установить действительную величину натяга и обеспечить точность диаметральных размеров упрочненных деталей. Приведена зависимость величины упругого подъема упрочненного слоя от физико-механических свойств материала.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, секториальный рабочий инструмент, пластическая деформация, подъем металла, внеконтактная деформация

Для цитирования: Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Оценка величины упругой разгрузки при маятниковом поверхностном пластическом деформировании // Научноёмкие технологии в машиностроении – 2023. – № 2 (140). – С. 8-14. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-8-14.

Original article

Value elasticity estimation in pendulum surface plastic deformation

Semyon A. Zaides¹, Dr.Sc.Tech.,
Minh Kuan Ho², postgraduate student

^{1, 2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹ zsa@istu.edu, ² minhquanho2605@gmail.com

Abstract. The elasticity of the hardened layer under pendulum surface plastic deformation is determined. Calculations are given using computer modeling Ansys 19.1 to estimate the influence of the main technological parameters and modes of pendulum SPD (Surface plastic deformation) by the amount of metal rate of upward gradient, which makes it possible to establish the actual amount of tension and ensure the accuracy of the diametrical dimensions of the hardened parts. The dependence of the elastic rise of the hardened layer on the physical and mechanical properties of the material is given.

Keywords: surface plastic deformation, sectorial working tool, plastic deformation, metal rate of upward gradient, non-contact deformation

For citation: Zaides S.A., Ho Minh Kuan Value elasticity estimation in pendulum surface plastic deformation. / Science intensive technologies in engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 8-14. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-8-14.

Введение

При изготовлении деталей машин обычно используют технологические процессы, основанные на удалении части материала (механическая обработка резанием) или на перераспреде-

лении металла в объеме тела (обработка давлением). Если после обработки резанием стабильность формы и размеров практически сохраняется, то после обработки давлением объем детали несколько изменяется в результате

так называемого процесса разгрузки [1].

При больших пластических деформациях величина упругой разгрузки весьма мала по сравнению с деформациями и обычно входит в величину поля допуска на размер изготавливаемого изделия. При малых пластических деформациях, которые имеют место в процессах поверхностного пластического деформирования, величина упругой разгрузки может уже влиять на достижение точности обрабатываемого размера, так как указанные процессы обычно назначают для деталей повышенной точности. В этом случае при настройке рабочего инструмента необходимо учитывать величину упругой разгрузки. Особенно актуален этот вопрос в тех случаях, когда необходимо изготавливать деформирующий инструмент замкнутого рабочего контура (дорны, матрицы), от размеров которого зависит точность, например, отверстия при дорновании или точность наружного диаметрального размера при охватывающем деформировании [2].

При обработке металлов давлением происходит накопление потенциальной энергии за счет упругих и пластических деформаций. После прекращения внешнего воздействия на заготовку необратимые пластические изменения остаются, а обратимые упругие деформации исчезают, то есть упругие искажения материала возвращаются в исходное состояние. Можно предположить, что чем больше величина работы, совершаемая при пластическом деформировании металла, чем интенсивнее происходят дислокационные процессы, тем больше потенциальной упругой энергии накапливается при обработке, тем выше будет и величина упругой разгрузки [3].

В настоящее время в Иркутском национальном исследовательском техническом университете ведутся работы по разработке новых способов отделочно-упрочняющей обработки [4, 5] на основе поверхностного пластического деформирования (ППД). Целью этих разработок является повышение напряженно-деформированного состояния в очаге упруго-пластической деформации за счет использования более сложной кинематики деформирующего инструмента. Расчетные и экспериментальные результаты, выполненные в работах [6, 7] показали, что при более сложной кинематике технологического процесса происходит повышение механических свойств обрабатываемого материала, что непосредственно влияет на рост потенциальной энергии, а, следовательно, и на величину упругой разгрузки.

Очаг упруго-пластической деформации

при ППД обычно состоит из двух зон: зона непосредственного контакта рабочего инструмента с деталью и зона внеконтактной деформации, которая происходит вне зоны контакта рабочего инструмента с обрабатываемой поверхностью. Таких зон внеконтактной деформации бывает два вида. Первый вид представляет собой упруго-пластическую волну, которая формируется перед рабочим инструментом. Второй вид формируется после рабочего инструмента и представляет собой подъем поверхностного слоя металла в результате упругой разгрузки [8]. В данной работе рассмотрен второй вид внеконтактной деформации, который имеет место при маятниковом ППД.

В связи с вышеизложенными проблемами информация о величине подъема металла является немало важной задачей при создании нового способа ППД. Исходя из этого, целью данной работы является определение величины упругой разгрузки в зависимости от основных параметров и режимов маятникового ППД, которая позволит установить действительную величину натяга, а, следовательно, обеспечить точность диаметрального размера цилиндрических деталей после обработки ППД.

Маятниковое поверхностное пластическое деформирование

Для обеспечения интенсификации напряженного состояния в очаге деформации, которое позволит снизить величину радиального натяга при обработке нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей, был разработан новый способ ППД [4], основанный на маятниковом воздействии секториального рабочего инструмента (рис. 1). Особенность новой кинематики деформирующего инструмента заключается в том, что поверхностное пластическое деформирование осуществляется за счет поочередных процессов качения и скольжения рабочего инструмента.

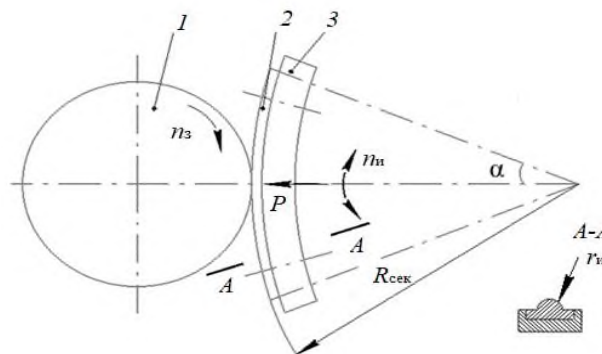


Рис. 1. Кинематическая схема маятникового ППД
1 – заготовка; 2 – деформирующий элемент; 3 – рабочий сектор инструмента

Моделирование маятникового ППД

Для определения размеров волны и подъема металла в поверхностном слое при воздействии секториального рабочего инструмента был использован программный комплекс Ansys 19.1, который позволяет эффективно решать различные задачи в сфере инженерной деятельности с использованием теории прочности и физики твердых тел [9, 10].

Для проведения расчетов в программе Ansys была построена геометрическая модель в виде упругопластического цилиндра и рабочего инструмента с секториальным и рабочим радиусами, соответственно $R_{сек}$, $r_{и}$.

Характеристики цилиндрического образца: в качестве заготовки был использован цилиндр диаметром $D_{заг} = 20$ мм; материал – конструкционная сталь 45 – упругопластическая, упрочняющаяся, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала – билинейная (предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа).

Характеристики инструмента: круговой сектор с радиусом скругления на цилиндрической поверхности; материал – ВК8, модуль упругости $E = 6 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

При помощи CAD/CAE системы Ansys 19.2 конечно-элементная форма цилиндрического образца создана со следующими параметрами: 7241 конечный элемент, 42624 узла; сетки квадратной формы; коэффициент трения в зоне контакта принят $\eta = 0,1$. Маятниковое ППД моделировалось с базовыми параметрами, представленными в табл. 1.

Следует отметить, что для выявления закономерности изменения геометрических размеров пластических волн, образующихся при внеконтактной деформации, была выбрана завышенная величина натяга ($t = 1,0$ мм), которая в производственной практике применяется весьма редко. Расчетная завышенная величина натяга позволит также обосновать его реальное значение, которое используется на практике.

1. Значения базовых параметров упрочнения

n_3 , об/мин	$n_{ин}$, ДВ.Х/МИН	t , мм	s , мм/об	$r_{и}$, мм	$R_{сек}$, мм	α , град
100	100	1,0	0,1	5	25	30

Результаты компьютерного моделирования и расчетов

Рассмотрим степень изменения величины подъема металла (Δ) в зависимости от технологических параметров и режимов маятникового поверхностного пластического деформирования (ППД).

Очаг деформации в направлении подачи при маятниковом ППД, представленный на рис. 2, показывает, что процесс упругопластической деформации более интенсивно происходит в зоне перед рабочим инструментом по сравнению с зоной за инструментом.

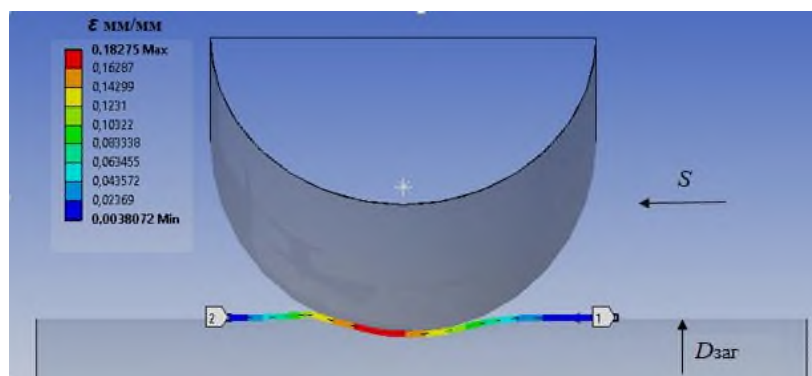


Рис. 2. Распределение интенсивности деформации в направлении подачи при маятниковом ППД

Зоны контактной и внеконтактной деформации в процессе маятникового ППД показаны на рис. 3. Очевидно, что при непосредственном воздействии рабочего инструмента в зоне контакта происходит пластическое течение металла, которое сопровождается формированием на поверхностном слое упругопластических волн. После перемещения рабочего

инструмента упругая деформация исчезает, что приводит к снижению линейных размеров упругопластической волны до некоторой постоянной величины, которая представляет собой степень подъема металла (Δ). Слева от рабочего инструмента в направлении подачи образуется волна высотой h' , а справа небольшая волна высотой h (см. рис.3).

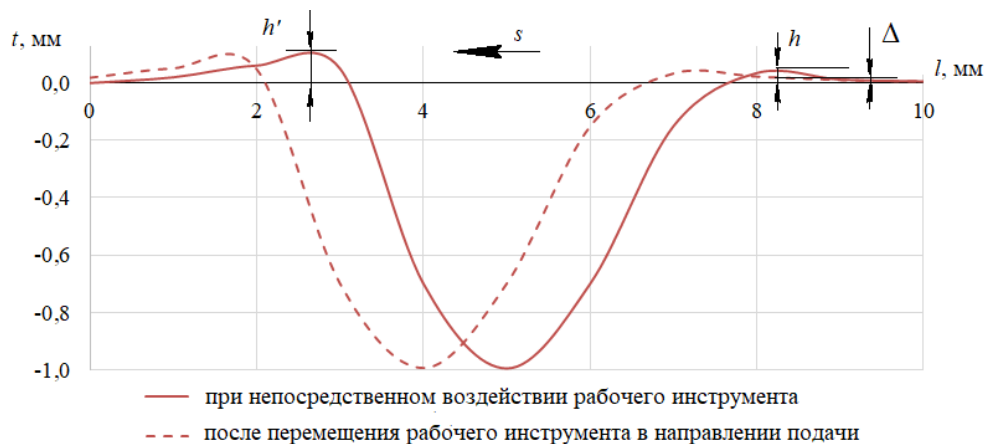


Рис. 3. Очаг внеконтактной деформации при маятниковом ППД

Зависимость высоты упругопластической волны (h) и величины подъема металла (Δ) от величины натяга t во внеконтактной зоне деформации показана на рис. 4, а. Следует отметить, что при малом значении величины натяга ($t = 0,1 \dots 0,2$ мм) подъем металла (Δ) небольшой и составляет $1,3 \dots 2,3$ мкм. Величина подъема металла (Δ) достигает максимума (около 45 мкм) при наибольшем значении вы-

соты h (при $t = 0,5 \dots 0,6$ мм). При дальнейшем увеличении натяга подъем металла плавно уменьшается. Это объясняется тем, что при величине натяга более 0,5 мм (при обработке углеродистых сталей) обычно происходит перенаклеп, материал охрупчивается, что приводит к снижению пластических процессов в зоне деформации.

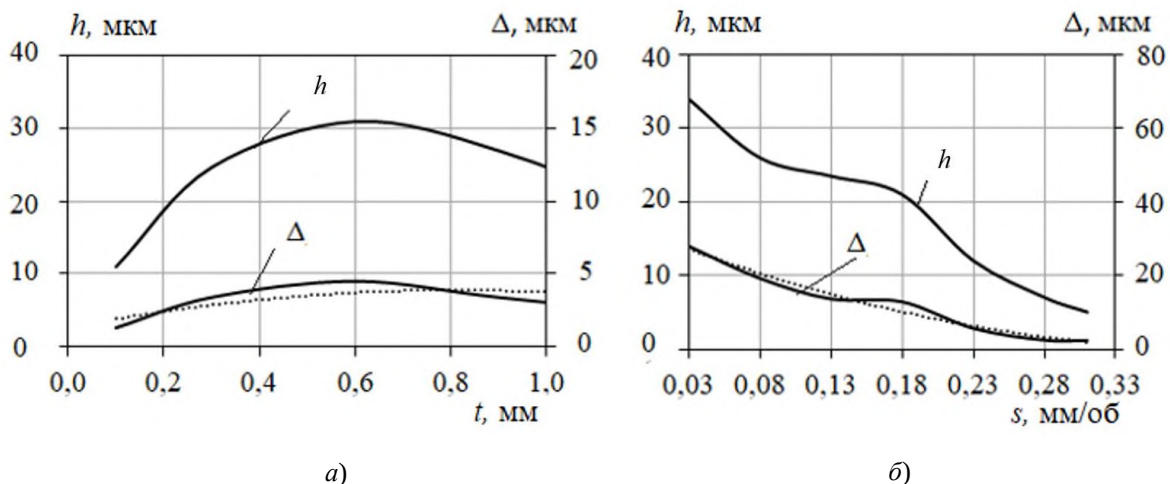


Рис. 4. Зависимость высоты волны h и величины подъема металла (Δ):
а – от величины натяга; б – от величины подачи

Зависимость величины подъема металла от величины натяга можно описывать следующим выражением:

$$\Delta = -0,004t^2 + 0,0065t + 0,0013 \quad (1)$$

Влияние продольной подачи на высоту волны и величину подъема металла показано на рис. 4, б. Установлено, что с увеличением продольной подачи от 0,03 до 0,33 мм/об высота упругопластической волны (h) и величина подъема металла (Δ) уменьшаются. При подаче s свыше 0,33 мм/об величина внеконтактной деформации приближается к нулю.

Влияние частоты вращения заготовки и частоты маятникового движения инструмента на высоту волну и на величину подъема металла представлено на рис. 5, а и рис. 5, б. Можно сделать вывод о том, что высота упругопластической волны практически не изменяется в данном диапазоне частоты вращения заготовки и частоты маятникового движения инструмента. При этом подъем металла составляет примерно $2,2 \dots 2,3$ мкм.

Зависимость величины подъема металла от угловой амплитуды рабочего инструмента по-

казана на рис. 5, в. Следует отметить, что при увеличении угловой амплитуды от 5° до 30° высота волны и подъем металла непрерывно уве-

личивается, а при $\alpha > 30^\circ$ высота волны, а следовательно, и подъем металла снижаются.

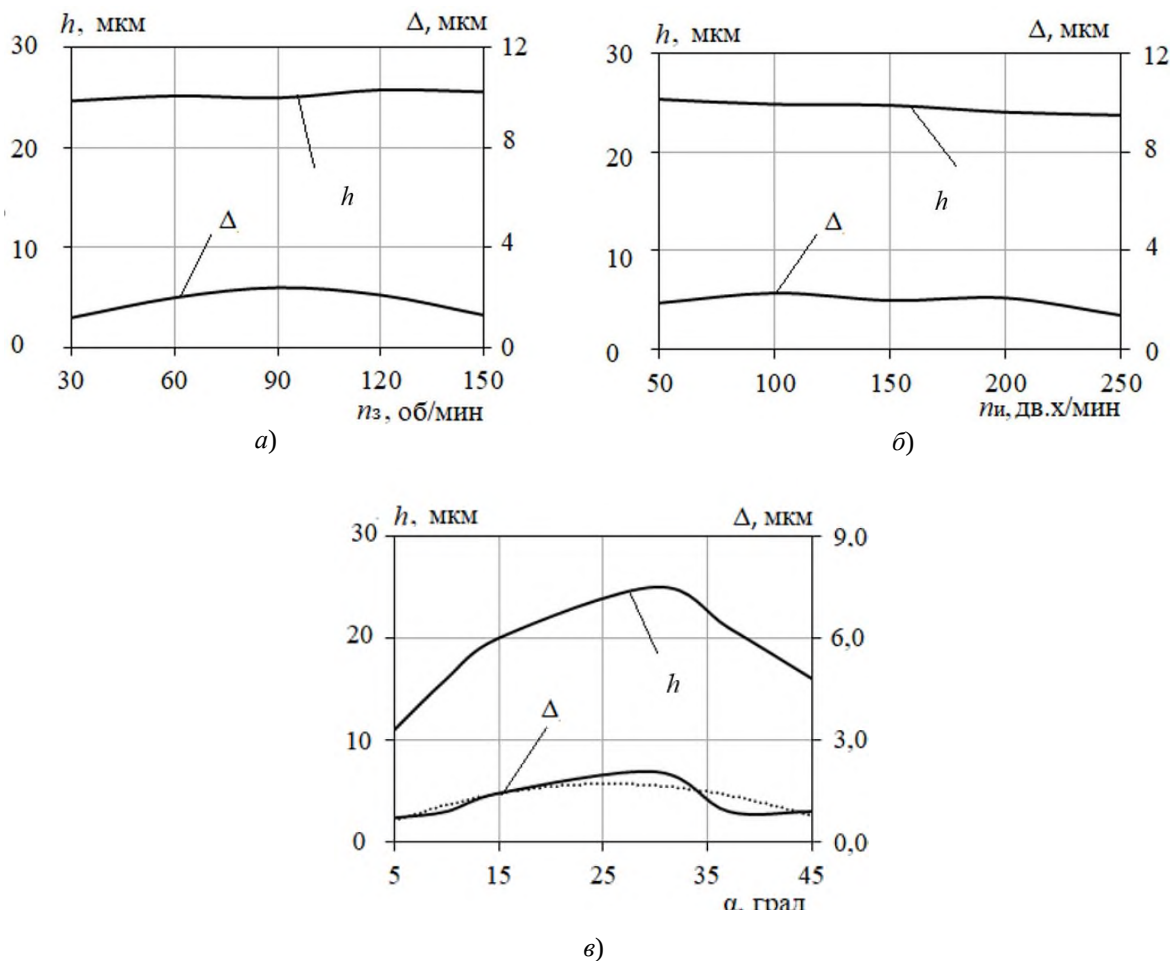


Рис. 5. Зависимость высоты волны h и величины подъема металла (Δ) от:

а – частоты вращения заготовки; б – частоты маятникового движения инструмента; в – угловой амплитуды инструмента

Для того чтобы ответить на вопрос: в каких случаях следует учитывать величину подъема металла после маятникового ППД, были выполнены расчеты Δ для некоторого

диапазона диаметра заготовки (табл. 2) при величине натяга $t = 0,1$ мм и $t = 0,2$ мм, которые достаточно широко применяются на практике.

2. Влияние внеконтактной деформации на точность диаметральных размеров (при $t = 0,1$ и $0,2$ мм)

Диаметр заготовки	Величина внеконтактной деформации,* (мкм)		Интервал номинальных размеров (мм)	Числовые значения полей допусков (мкм)		
$D_{\text{заг}}$ (мм)	h	Δ		Квалитет		
				1	2	3
10	17,2...21,3	1,8...2,5	от 6 до 10	1	1,5	2,5
20	11,2...18,8	1,3... 2,3		1,5	2,5	4
40	11,1...15,3	1,2...1,9	от 18 до 30	1,5	2,5	4
60	11,1...15,1	1,1...1,7	от 30 до 50	1,5	2,5	4

(*) первые числа соответствуют натягу $t = 0,1$ мм, вторые – $t = 0,2$ мм

Из табл. 2 следует, что при упрочнении заготовок диаметрами от 10 до 20 мм подъем металла (Δ) сопоставим с точностью диаметральных размеров по квалитету 2, 3, а при обработ-

ке заготовок диаметрами 40...60 мм подъема металла (Δ) сопоставим с точностью по квалитету 1. Таким образом, при изготовлении достаточно точных деталей необходимо учитывать

величину подъема металла (Δ) после ППД, особенно если используется деформирующий инструмент с замкнутым контуром рабочего профиля.

Для выявления закономерности изменения

ния высоты волны и величины подъема в зависимости от физико-механических свойств материала после маятникового ППД, выполнены расчеты для некоторых черных и цветных металлов (рис. 6).

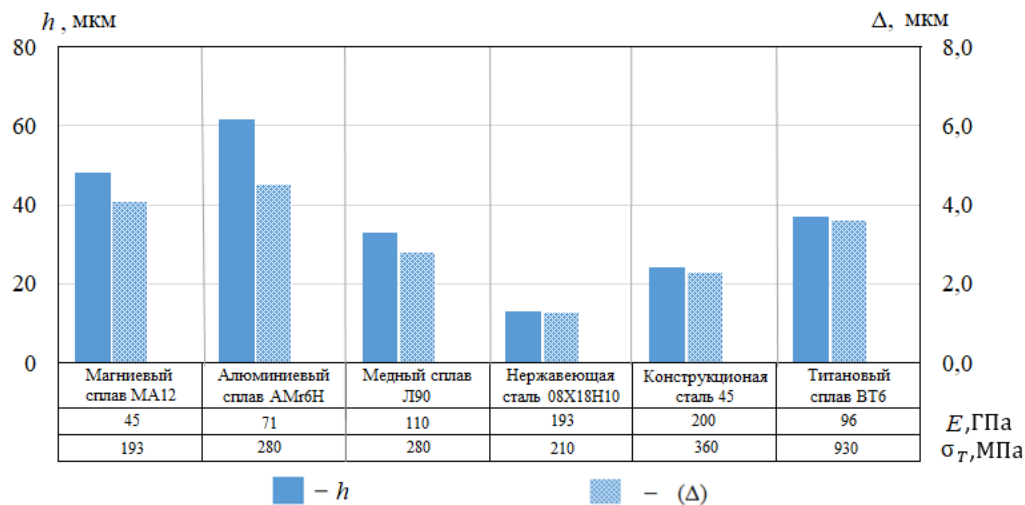


Рис. 6. Влияние физико-механических свойств металла на величину подъема (при базовых режимах обработки)

Влияние на высоту волны и на величину подъема металла оказывают физико-механические характеристики материала, что следует из рис. 6. Наибольшее значение высоты волны и величины подъема имеют материалы с низким модулем упругости (магнийевый сплав МА12, алюминиевый сплав АМг6Н). Меньшая величина подъема металла наблюдается при обработке нержавеющих (08Х18Н10) и конструкционных сталей (сталь 45).

Исследуя внеконтактную деформацию при маятниковом ППД, была выявлена не-

большая волна, возникающая за рабочим инструментом. Ее зависимость от высоты волны, возникающей перед инструментом показана на рис. 7, а. Численные расчеты показывают, что она почти в 1,5 – 2 раза меньше волны перед инструментом. Влияние высоты волны перед инструментом на подъем металла, из которого следует, что величина подъема упрочненного слоя в 15 – 20 раз меньше высоты волны h' перед рабочим инструментом, представлено на рис. 7, б.

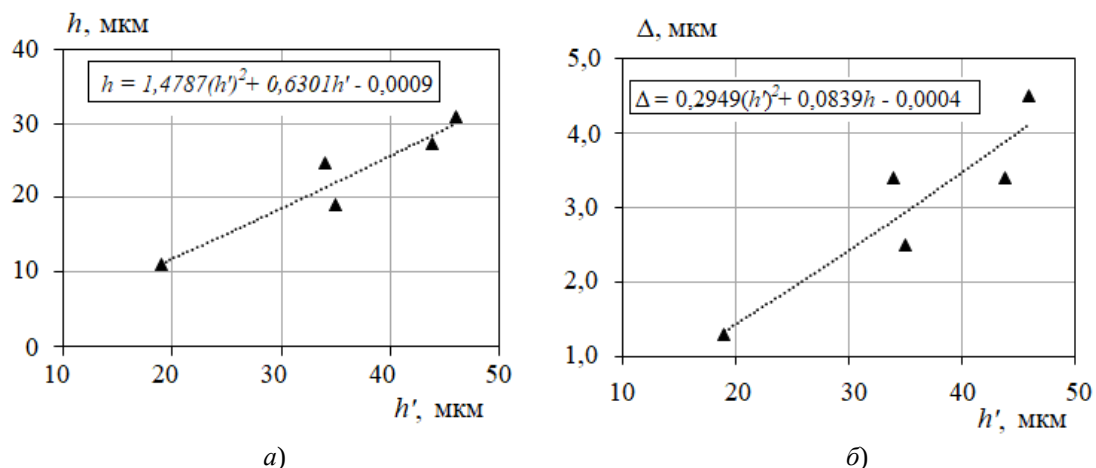


Рис. 7. Соотношение между высотами волн и величиной подъема упрочненного слоя:
а – соотношение между h и h' ; б – соотношение между Δ и h'

Анализируя рис. 7 можно отметить, что при известном значении высоты волны h' можно определить числовое значение высоты h , а, следовательно и подъем металла, который является первоначальной информацией для оцен-

ки точности диаметральных размеров упрочненных деталей.

Закключение

По результатам компьютерного моделиро-

вания и численных расчетов установлено:

1. При малой величине натяга ($t = 0,1 \dots 0,2$ мм) подъем металла после маятникового ППД, составляет $1,3 \dots 2,3$ мкм, что соответствует полю допуска 1-го качества точности. Наибольший подъем упрочнённого слоя имеет место при радиальном натяге около 0,5 мм. С увеличением диаметра заготовки величина подъема упрочнённого слоя снижается.

2. Повышение подачи рабочего инструмента приводит к снижению величины подъема упрочнённого слоя. При подаче свыше 0,33 мм/об величина подъема приближается к нулю. Величина подъема металла в малой степени зависит от частоты вращения заготовки и частоты маятникового движения рабочего инструмента.

3. Максимальное значение высоты волны и величины подъема получено при обработке материалов с низким модулем упругости (магний-сплав МА12, алюминий-сплав АМг6Н), а при обработке металла с более высоким модулем упругости (нержавеющая сталь 08Х18Н10 и конструкционная сталь 45) значение высоты волны и величины подъема значительно ниже.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Суслов А.Г., Дальский А.М.** Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
2. **Вирт А.Э.** Влияние силы деформирования при поверхностном пластическом деформировании на глубину упрочнения поверхностного слоя детали // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 1(115). С. 44–28.
3. **Демин В.А.** Управление качеством заготовок, получаемых обработкой металлов давлением // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. № 3 (8). С. 3–9.
4. **Зайдес С.А., Хо Минь Куан.** Способ поверхностно-пластического деформирования наружной поверхности детали в виде тела вращения / Пат. 2757643 RU. заявл. 04.02.2021; опубл. 19.10.2021.
5. **Зайдес С.А., Фам Ван Ань.** Способ поверхностного пластического деформирования / Пат. 2707844 RU; заявл. 26.02.2019; опубл. 29.11.2019.

6. **Zaides S.A., Ho Minh Quan, Mai Duc Nghia.** Effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface / Polytech Jornal. 2021. T. 25. № 6 (161).

7. **Лебедев В.А.** Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки / под ред. А.В. Киричек. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 403 с.

8. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. Москва: Машиностроение, 2000. 320 с.

9. **Saiaf Bin Rayhan, Md Mazedur Rahman.** Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer // Procedia Structural Integrity. 2020. Vol. 28. P. 1892–1900.

10. **Басов К.А.** Ansys: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

REFERENCES

1. **Suslov A.G. Dalsky A.M.** Scientific foundations of engineering technology. M.: Mashinostroenie, 2002, 684 p.
2. **Wirth A.E.** Influence of the deformation force during surface plastic deformation on the depth of hardening of the surface layer of the part // high technologies in mechanical engineering, No. 1(115), 2021, P 44-28.
3. **Demin V.A.** Quality management of workpieces obtained by pressure treatment of metals // Science-intensive technologies in mechanical engineering, No. 3 (81), 2018, C 3-9.
4. **Zaides S.A., Ho Ming Quan.** The method of surface-plastic deformation of the outer surface of the part in the form of a body of revolution / Pat. 2757643 EN. application 04.02.2021; publ. 10/19/2021.
5. **Zaides S.A., Pham Van Anh.** The method of surface plastic deformation /. Pat. 2707844 EN.; application 26.02.2019; publ. 11/29/2019.
6. **Zaides S.A., Ho Minh Quan, Mai Duc nghia.** Effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface. /iPolytech Jornal T25 №6 (161) 2021.
7. **Lebedev V.A.** Efficient technologies of surface plastic deformation and combined processing / ed. A.V. Kirichuk. M.: Spektr Publishing House, 2014. 403 p.
8. **Suslov A.G.** The quality of the surface layer of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 2000. 320 p.
9. **Saiaf Bin Rayhan, Md Mazedur Rahman.** Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer // Procedia Structural Integrity, Volume 28,2020, P. 1892-1900.
10. **Basov K.A.** Ansys: user guide. M.: DМК Press, 2005. 640 p.

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

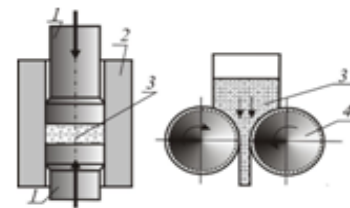
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.12.2022; одобрена после рецензирования 15.12.2022; принята к публикации 28.12.2022.

The article was submitted 08.12.2022; approved after reviewing 15.12.2022; assepted for publication 28.12.2022.



Научные технологии в машиностроении. 2023. №2 (140). С. 15-25.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №2 (140). P. 15-25.

Научная статья
УДК 621.923.9
doi:10.30987/2223-4608-2023-2-15-25

Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна

Артём Александрович Волковский¹, аспирант,
Владимир Федорович Макаров², д.т.н.

^{1, 2} Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

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

² makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. На основе проведенных экспериментальных исследований по сравнительному анализу качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов определены показатели эффективности прерывистого шлифования и определен перечень рекомендаций к применению абразивной обработки ПКМ.

Ключевые слова: прерывистое шлифование, абразивная обработка ПКМ, шлифование, температура при шлифовании, шероховатость поверхности, деламация, засаливание, режимы резания

Для цитирования: Волковский А.А. Макаров В.Ф. Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 2 (140). – С. 15-25. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-15-25.

Original article

Comparative quality analysis for treated surface in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials based on carbon fiber

Artem A. Volkovsky¹, postgraduate student,
Vladimir F. Makarov², Dr.Sc.Tech.

^{1, 2} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

¹ VolkovskiiWork@mail.ru, ² makarovv@pstu.ru

Abstract. Based on the conducted experimental studies regarding the comparative quality analysis for treated surfaces in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials, the abrupt grinding performance criteria were determined and an advice list for abrasive processing of PCM was also made.

Keywords: abrupt grinding, abrasive processing of PCM, grinding, grinding temperature, surface roughness, delamination, blunting, cutting modes

For citation: Volkovsky A.A., Makarov V.F. Comparative quality analysis for treated surface in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials based on carbon fiber. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 15-25. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-15-25.

Введение

Современное машиностроение на сегодняшний день находится на этапе переоценки путей собственного развития, последнее напрямую связано с применением полимерных композиционных материалов (ПКМ) в новых для себя отраслях промышленности [1, 2]. Полимерные композиты благодаря сбалансированности физико-механических свойств получают возможности применения в более нагруженных узлах машин. Таким образом, формируется тенденция на постепенную замену традиционных материалов и сплавов на полимерные композиционные материалы, в основе которых в качестве армирующего элемента выступают высокопрочные стеклянные и угольные волокна [2]. Широкое применение композитов находит авиационная промышленность, где изготавливаются звукопоглощающие панели, элементы корпусов, фюзеляж, носовая часть и крылья инновационного гражданского лайнера МС-21. Производство МС-21 имеет тенденцию на увеличение объемов производства, что обусловлено плановыми показателями годового выпуска до 200 единиц к 2030 г.

Высокие темпы расширения областей применения ПКМ влекут за собой необходимость обеспечения повышенных требований показателей качества изделий, в ряду которых на лидирующих позициях находится качество поверхностного слоя. Последнее, зачастую определяется параметром шероховатости обработанной поверхности, наличием трещин и выровов, что может привести к выходу из строя всех технической системы. В настоящее время, исследованием проблемы повышения и стабилизации качества обработанной поверхности из ПКМ занимается большое число исследователей по всему миру [3 – 6]. В качестве основных решаемых проблем обеспечения качества, выступают такие как ликвидация дефектов – деламация, ворсистость, термодеструкция и и растрескивание полимерной матрицы композита.

При исследовании причин возникновения и разработки методики устранения вышеуказанных дефектов, были определены основополагающие факторы, которые оказывают непосредственное влияние на качество обработанной поверхности. К ним относятся: геометрия режущего инструмента, твердость режущего инструмента и режимы обработки [6].

Для обеспечения высоких показателей качества определены основные направления исследований, к которым относятся высокоскоростное фрезерование, электроэрозионная об-

работка ПКМ, нанесение вспомогательных покрытий на обрабатываемую поверхность, изменение геометрии режущего инструмента при операциях осевой обработки, гидроабразивная резка и абразивная обработка ПКМ [3 – 6]. Последняя может быть представлена двумя направлениями: обработка гибкими лепестковыми кругами, обработка жесткими абразивными инструментами.

Абразивная обработка гибким инструментом, позволяет обеспечить достаточный уровень показателей шероховатости обработанной поверхности и применяется в технологических процессах, как подготовительная операция под последующую склейку изделий из композитов. В связи с узкой направленностью данной технологии и специфики режущего инструмента, исключается возможность подконтрольного регулирования глубины резания и, как следствие, производительности технологического процесса изготовления изделия.

Таким образом, данная технология не может быть полноценно адаптирована для чистовой обработки торцевых поверхностей звукопоглощающих панелей, корпусов, крыльев и прочих изделий в последующем, сопрягающихся с другими деталями и узлами машины. Обработка жестким абразивным инструментом, позволяет обеспечить наилучшую шероховатость обработанной поверхности $Ra\ 0,4...0,8\ \mu\text{м}$ и точность IT6, IT7, однако, этот метод является малоисследованным [7 – 9]. При сопоставлении показателей качества, полученных при обработке лезвийным и абразивным инструментом, последний занимает преимущественную позицию.

Улучшение качества обработанной поверхности при шлифовании ПКМ обусловлено тем, что абразивная обработка проводится на высоких скоростях резания порядка 35...50 м/с, что в 10 – 15 раз превосходит обработку лезвийным инструментом. Кроме того, абразивные зерна обладают более высокой твердостью, с обеспечением постоянной острой режущей кромкой. В результате, абразивное зерно перерезает твердое волокно ПКМ, не деформируя, не вытягивая и не ломая его как при лезвийной обработке [8].

Однако операция шлифования вызывает повышенные температуры в зоне обработки, что является негативным фактором при обработке термореактивных композитов на полимерной основе. По результатам исследований, представленных кафедрой «Инновационные технологии машиностроения» Пермского На-

ционального Исследовательского Политехнического Университета, определено влияние режимов плоского шлифования на температуру в зоне обработки и шероховатость обработанной поверхности. При измерении температуры зафиксированы значения до 121 °С, что является неблагоприятным фактором для обработки ПКМ [8]. В качестве решений, для снижения температуры в зоне резания, предложено применение методики прерывистого шлифования, представленного профессором А.В. Якимовым [10]. Применение прерывистого шлифования обеспечивает снижение температуры в зоне обработки и стабилизация показателей параметра качества обработанной поверхности. Методика прерывистого шлифования, ранее имела экспериментальное и теоретическое обоснование только при обработке металлов, что гово-

рит о разнородности процессов при обработке ПКМ, в связи с чем реализованы экспериментальные исследования.

Методика проведения экспериментального исследования

В основу экспериментальных исследований заложен сравнительный анализ температуры резания и качества обработанной поверхности при традиционном и прерывистом плоском шлифовании ПКМ.

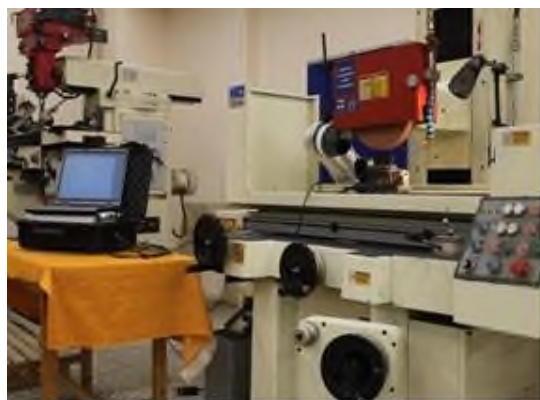
В качестве исследуемых параметров принимались температура поверхностных слоев T , °С в процессе обработки и шероховатость поверхности Ra , мкм. Экспериментальные исследования реализованы согласно методике планирования полного факторного эксперимента 2^2 (табл. 1).

1. Средства технического оснащения экспериментального исследования

Оборудование и СТО	Наименование	Назначение
Плоскошлифовальный станок	JETJPSG 1224H	Обеспечение механической обработки абразивным инструментом
Режущий инструмент 300 x 76 x 40 мм	25A F60 K 7 V 35 2250 64C F60 K 7 V35 2250	
Пирометр	Bosch UniversalTepm	Измерение температуры в верхних слоях заготовки
Профилометр	MarSurf PS10	Оценка качества обработанной поверхности по параметру шероховатости Ra , мкм
Диагностический стенд Камертон РОС	Камертон РОС	Оценка динамических изменений виброускорений технической системы

Выбор параметров исследования обосновывается физико-механическими свойствами связующего материала композита, который представляет собой эпоксидную смолу. Последняя, относится к классу термореактивных полимеров, поэтому необходимо вести кон-

троль температуры с целью снижения вероятности достижения температуры разложения смолы. Параметр шероховатости Ra определен с учетом комплексности предоставляемой информации о качестве обработанной поверхности, в том числе и наличии дефектного слоя.



а)



б)

Рис. 1. Экспериментальная установка:

а – общий вид проведения исследований; б – зона обработки

Шлифовальный круг для прерывистого шлифования изготовлен согласно методике расчета прерывистого профиля шлифовального

круга, предложенной А.В. Якимовым [10]:

1. Определение полуширины теплового источника h (для плоского круга):

$$h = 0,5\sqrt{dt}, \quad (1)$$

где d – диаметр инструмента, м; t – глубина резания, м.

2. Определение безразмерного параметра скорости:

$$u = \frac{v_d \cdot h}{a}, \quad (2)$$

где v_d – скорость подачи детали, (для подачи стола со скоростью 5 м/мин, 10 м/мин, 15 м/мин равны соответственно 0,083 м/с, 0,166 м/с, 0,249 м/с); a – температуропроводность материала, для ПКМ на основе углеволокна $2,165 \cdot 10^{-4}$, м²/с.

3. Вычисление критерия Фурье:

$$F_{\theta 1} = \frac{v - v_0}{A + B \cdot u}, \quad (3)$$

где A , B , v_0 – постоянные величины, характеризующие степень понижения температуры в зоне обработки; v – отношение длины паза к

длине сегмента режущей части.

4. Определение длин:

длина режущей части сегмента (мм):

$$l_1 = \frac{h^2 v_{кр} F_{\theta 1}}{a}, \quad (4)$$

где $v_{кр}$ – скорость резания м/с;

длина впадин (мм):

$$l_2 = l_1 \cdot v. \quad (5)$$

5. Определение количеств сегментов режущих частей

$$Z = \frac{\pi \cdot d_{кр}}{l_1 + l_2} \quad (6)$$

где $d_{кр}$ – диаметр круга, мм.

Результаты расчета параметров прерывистого шлифовального круга согласно рекомендуемым коэффициентам понижения температуры представлены в табл. 2.

2. Результаты расчета профиля прерывистого круга размерами 300 x 76 x 40 мм

Инструмент №	Шлифовальный круг наружным диаметром 300 мм			
	Степень понижения температуры	Длина вершин сегментов l_1 , мм	Длина впадин сегментов l_2 , мм	Количество сегментов Z
1	0,8	336,4	134,6	2
2	0,7	95,1	61,9	6
3	0,6	37,4	29,9	14

По результатам расчетов разработаны шаблоны профиля, согласно коэффициенту понижения температуры равному 0,7. Схема шаблона представлена на рис. 2. Данный коэффициент принят на основании ранее полученных значений температуры в зоне резания и обеспечения максимальной производительности заготовительного производства на этапе подготовки режущего инструмента.

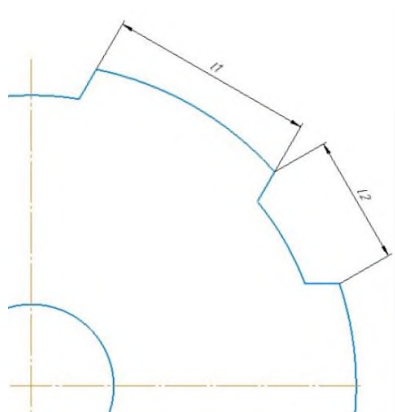


Рис. 2. Размерная схема режущих сегментов

Изготовление прерывистого профиля кругов производилось по шаблону с учетом пово-

рота делительного стола до формирования законченного сегмента. Фотографии изготовленных прерывистых шлифовальных кругов представлены на рис. 3.

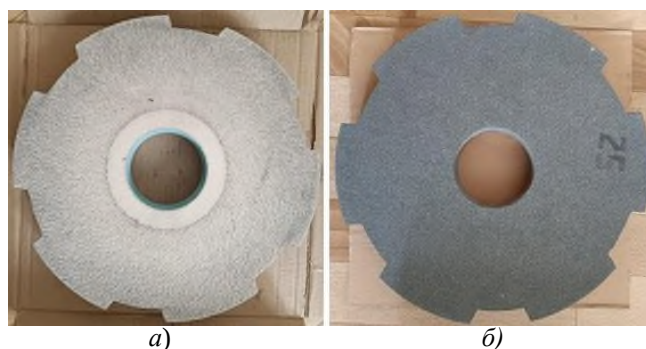


Рис. 3. Профиль прерывистых шлифовальных кругов:

а – 25A F60 K7 V35 2250; б – 64CF60K7V35 2250

Результат исследований

Обработанная поверхность, как было представлено в предыдущих работах, не включает в себе дефектов поверхностного слоя таких как деламинация, термодеструкция и растрескивание матрицы композита [7, 8]. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 3.

3. Результаты экспериментальных исследований

Материал инструмента	Зернистость F	Скорость резания v , м/мин	Глубина резания t , мм	Шероховатость поверхности Ra , мкм			$Ra_{ср}$	Температура резания T , °C			$T_{ср}$
64C	60	5	0,05	0,312	0,376	0,403	0,363	37,2	42,6	41,7	40,5
			0,1	0,425	0,437	0,476	0,446	40,1	37,0	39,4	38,8
			0,15	0,371	0,373	0,367	0,370	41,1	43,3	47,5	43,9
			0,2	1,346	1,796	1,671	1,604	50,6	46,7	60,3	52,5
			0,25	0,692	0,697	0,780	0,723	49,4	49,2	46,3	48,3
		10	0,05	0,519	0,544	0,515	0,526	41,8	40,9	40,3	41
			0,1	0,644	0,693	0,600	0,646	38,2	36,1	43,3	39,2
			0,15	0,530	0,481	0,618	0,543	46,4	47,2	43,5	45,7
			0,2	0,638	0,711	0,745	0,698	60,9	54,3	55,2	56,8
			0,25	0,894	0,910	0,871	0,892	61,8	63,9	64,2	63,3
	60 Прерывистый круг	5	0,05	1,017	0,988	1,031	1,012	31,6	34,4	33,3	33,1
			0,1	0,756	0,801	0,852	0,803	38,7	38,5	39,8	39
			0,15	1,281	1,108	1,117	1,169	49,3	50,7	49,9	49,9
			0,2	0,814	0,808	0,960	0,861	47,8	47,2	47,1	47,4
			0,25	0,974	0,990	0,993	0,986	53,9	55,9	55,7	55,2
		10	0,05	1,208	1,178	1,195	1,194	34,2	35,3	35,7	35,1
			0,1	1,289	1,304	1,261	1,285	38,6	40,0	40,8	39,8
			0,15	0,970	0,955	1,013	0,979	43,6	50,9	49,7	48,1
			0,2	0,730	0,756	0,770	0,752	53,7	53,4	52,9	53,3
			0,25	0,966	1,042	1,002	1,003	65,6	62,4	62,0	63,3
25A	60	5	0,05	0,404	0,455	0,444	0,434	43,5	41,6	40,7	41,9
			0,1	0,502	0,560	0,505	0,522	42,6	47,3	48,2	46,0
			0,15	0,786	0,741	0,777	0,768	50,3	49,7	49,4	49,8
			0,2	0,637	0,667	0,654	0,653	53,9	51,6	52,4	52,6
			0,25	0,916	0,855	0,918	0,896	54,7	56,2	60,1	57
		10	0,05	0,435	0,443	0,469	0,449	40,1	42,6	41,7	41,5
			0,1	0,614	0,593	0,578	0,595	40,0	46,3	49,3	45,2
			0,15	0,530	0,560	0,552	0,547	53,3	57,2	53,2	54,6
			0,2	0,806	0,915	0,878	0,866	52,0	57,2	55,4	54,9
			0,25	1,113	1,036	1,097	1,082	59,4	64,6	62,7	62,2
	60 Прерывистый круг	5	0,05	0,816	0,639	0,802	0,752	33,9	31,7	31,4	32,3
			0,1	0,791	0,874	0,817	0,827	38,5	35,2	38,6	37,4
			0,15	1,236	1,306	1,241	1,261	37,3	41,7	43,2	40,7
			0,2	0,960	0,891	0,966	0,939	44,8	44,2	43,7	44,2
			0,25	2,098	1,501	2,112	1,904	50,0	49,8	51,6	50,5
		10	0,05	0,820	0,896	0,813	0,843	33,1	33,8	35,6	34,2
			0,1	0,944	0,787	0,933	0,888	40,8	36,3	35,5	37,5
			0,15	1,406	1,342	1,338	1,362	48,6	46,2	49,0	47,9
			0,2	1,170	1,117	1,196	1,161	47,8	48,5	47,8	48,0
			0,25	1,676	1,578	1,603	1,619	48,8	50,2	49,8	49,6

По результатам, представленным в табл. 3, были построены диаграммы влияния режимов обработки на шероховатость обработанной поверхности и температуру в верхних слоях заготовки (рис. 4, 5).

Качество обработанной поверхности при прерывистом шлифовании имеет более низкие значения относительного шлифования сплошным инструментом, как видно из рис. 4.

Последнее может быть причиной ударных нагрузок ввиду вхождения в зону контакта с заготовкой нового режущего сегмента круга. Так же стоит отметить, что применение прерывистого шлифования позволяет обеспечить снижение температуры в верхних слоях, что демонстрируют результаты, представленные в табл. 3 и на рис. 5.

Диаграмма влияния режимов обработки сплошными и прерывистыми шлифовальными кругами на качество обработанной поверхности

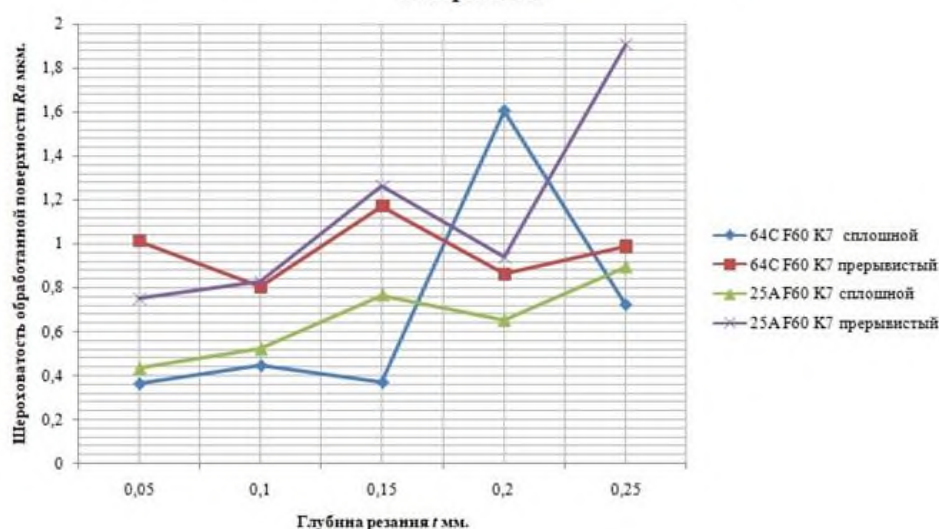


Рис. 4. Влияние режимов обработки сплошными и прерывистыми шлифовальными кругами на качество обработанной поверхности

Диаграмма влияния режимов обработки сплошными и прерывистыми шлифовальными кругами на температуру в верхних слоях заготовки

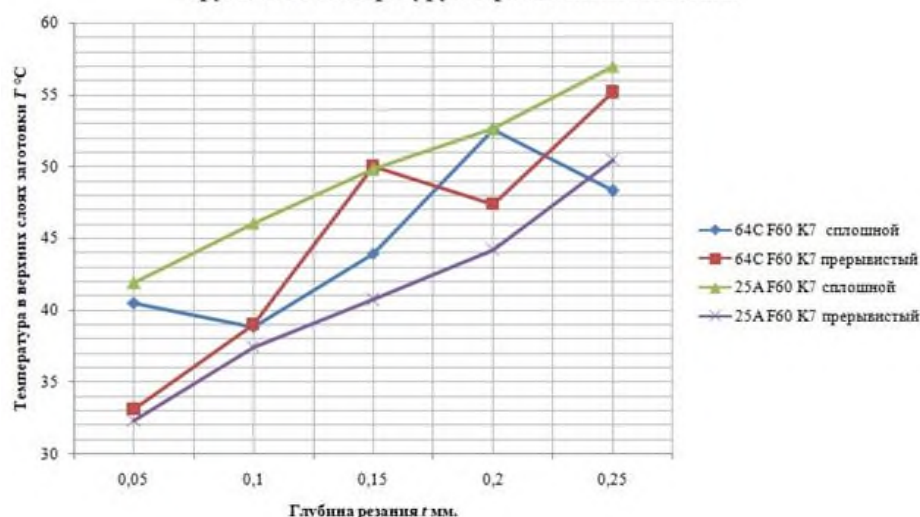


Рис. 5. Влияния режимов обработки сплошными и прерывистыми шлифовальными кругами на температуру в верхних слоях заготовки

Температура в верхних слоях заготовки является параметром, характеризующим качество обработанной поверхности по образованию дефектного слоя. Снижение температуры позволяет повысить эффективность хрупкого разрушения волокон, ввиду снижения засаливания и забивания пор между абразивными зернами шлифовального круга. Как представлено на рис. 5, применение прерывистого шлифования позволяет снизить температуру в верхних слоях заготовки в процессе обработки, что позволяет исключить явление термодеструкции связующего. Однако, стоит учитывать, что принятый коэффициент понижения температуры

равный 0,7 является неадекватным к обработке полимерных композиционных материалов и фактическое понижение температуры заключается в диапазоне от 0,8 до 0,85.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что увеличение глубины резания, стимулирует повышение износа абразивного круга и приводит к полному засаливанию периферии (рис. 6, а). В ранних исследованиях демонстрировалось, что назначение глубины обработки свыше 0,2 мм, влечет за собой повышение температуры в зоне обработки. Последнее, является фактором изменения деформационных процессов в зоне резания, которые

описываются снижением степени хрупкого разрушения и повышением упругих деформаций. При нагреве матрица композита разупрочняется и заполняет поры между абразивными зернами, тем самым снижая режущую способность инструмента. В результате инструмент

выглаживает обрабатываемую поверхность, но не перерезает армирующие волокна, формируя трещины и волнистость в поперечном сечении композита, что ярко выражено на изношенной поверхности круга (рис. 6, б).

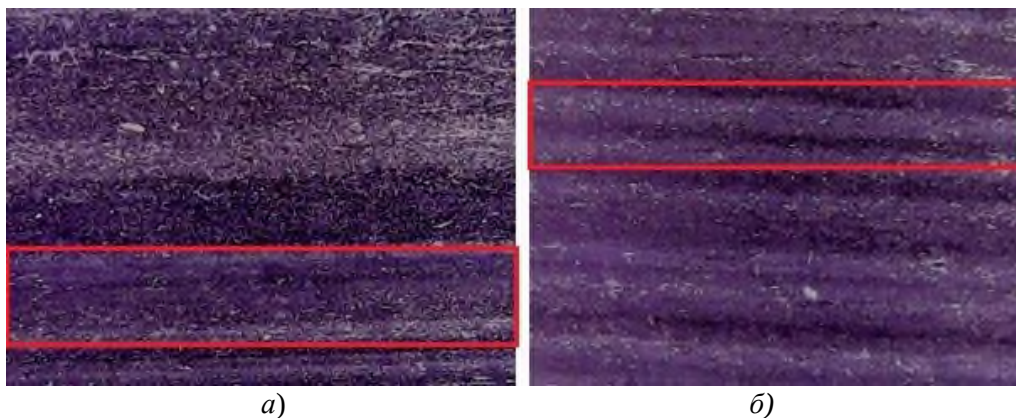


Рис. 6. Засаливание шлифовального круга с образованием борозд от сопротивления армирующих волокон при режимах резания $t = 0,25$ мм и $S = 5$ м/мин:

а – полное засаливание периферии шлифовального круга; б – образование борозд от непрорезанных армирующих волокон

Установлено, что стабильность процесса плоского шлифования и сохранения режущей способности обеспечивается при глубине резания до 0,15 мм, что подтверждается оценкой

износа абразивного круга. На рис. 7 представлено локальное засаливание периферии круга полимерной матрицей и перерезанными армирующими волокнами композита.

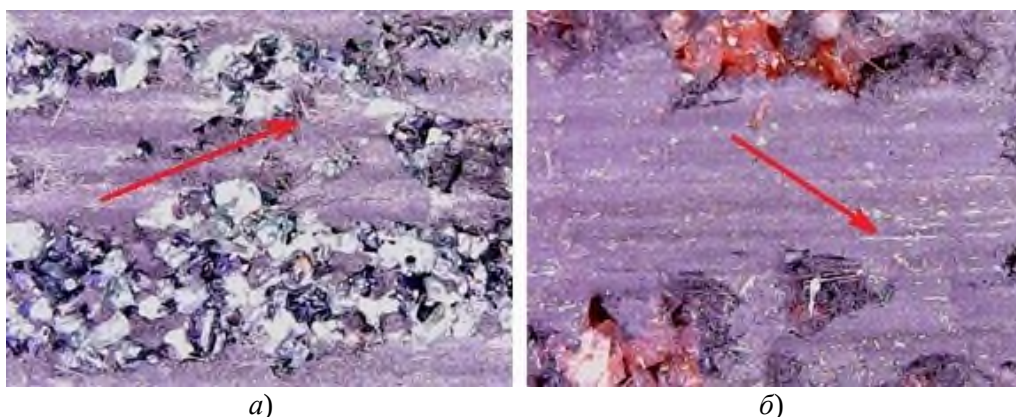


Рис. 7. Износ режущего инструмента при глубине резания $t = 0,05$ мм и $S = 5$ м/мин:

а – 64С F80 K 7 V 35 2250; б – 25А F46 K 8 V 35 2250

Установлено, что значения глубины обработки, сопровождаются допустимой температурой верхних слоев заготовки. Совокупность данных факторов обеспечивает высокое качество обработанной поверхности (см. табл. 4). Однако при сравнительном анализе качества обработанной поверхности и температуры поверхностных слоев заготовки возникают существенные отличительные черты.

Согласно рис. 8, можно утверждать, что прерывистое шлифование при прочих равных условиях влечет повышение качества обработанной поверхности от Ra 0,434 мкм при

сплошном шлифовании до 0,752 мкм при прерывистом на примере обработки шлифовальным кругом 64С F60 K7. Последнее может быть причиной динамических ударных нагрузок, возникающих при входе в зону контакта нового сегмента абразивного круга и заготовки. Таким образом, постоянное ударное воздействие стимулирует переменный характер упругих отжатый системы и, как следствие, нестабильность течения процесса резания. Периферия прерывистого круга, отражающая причины возникновения ударных нагрузок в осевом направлении представлена на рис. 9.



Рис. 8. Влияние режимов обработки прямым плоским и прерывистым шлифовальным кругом марки 64CF60 K7 V35 на качество обработанной поверхности

Согласно рис. 8, можно утверждать, что прерывистое шлифование при прочих равных условиях влечет повышение качества обработанной поверхности от Ra 0,434 мкм при сплошном шлифовании до 0,752 мкм при прерывистом на примере обработки шлифовальным кругом 64С F60 K7. Последнее может быть причиной динамических ударных нагрузок, возникающих при входе в зону контакта нового сегмента абразивного круга и заготовки. Таким образом, постоянное ударное воздействие стимулирует переменный характер упругих отжатий системы и, как следствие, нестабильность течения процесса резания. Периферия прерывистого круга, отражающая причины возникновения ударных нагрузок в осевом направлении представлена на рис. 9.

В связи с тем, что коэффициент

теплопроводности полимерного композиционного материала на основе углеволокна при эпоксидной связке ниже чем у традиционных металлов и сплавов, коэффициенты указанные в научной литературе не могут быть адекватны к абразивной обработке полимерных композиционных материалов



Рис. 9. Периферия прерывистого шлифовального круга марки 25A F60 K7 V35

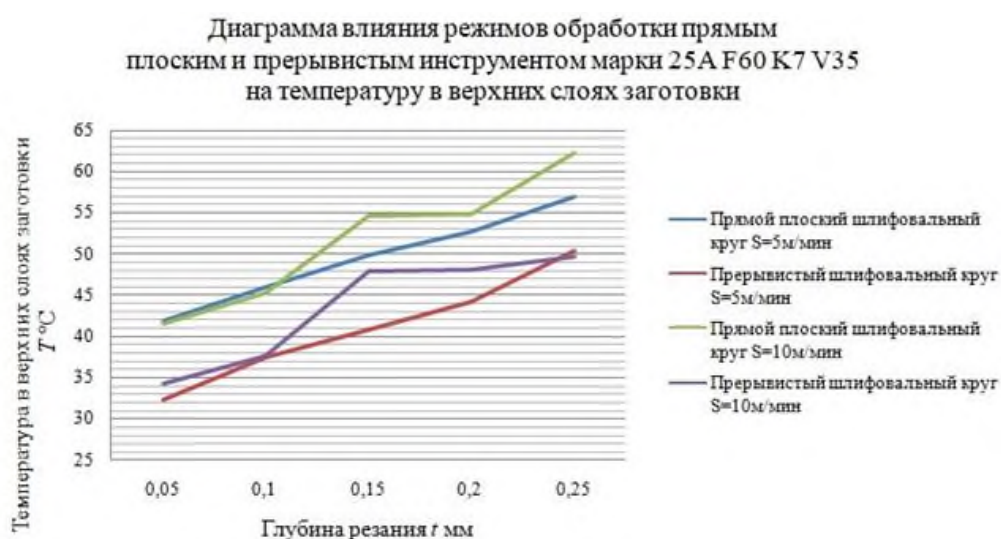


Рис. 10. Влияние режимов обработки прямым плоским и прерывистым шлифовальным кругом марки 25A F60 K7 V35 на температуру в верхних слоях заготовки

На основании результатов представленных в таб. 3 и рис. 10, представляется сводный анализ о характере возникновения температуры в зоне обработки. При низких глубинах обработки и скоростях подачи стола, работа возникающая в зоне контакта сегментов и заготовки имеет наименьшее значение, что объясняется снижением температуры. Однако при увеличении глубины резания и скорости подачи стола, с учетом ударной нагрузки, работа совершаемая системой для удаления материала с обрабатываемой поверхности стремится к увеличению и тем самым стимулирует рост температуры до значений сопоставимых с шлифованием прямым плоским шлифовальным кругом. Увеличение глубины резания повышает объем материала приходящегося на удаление одним сегментом, следовательно, больший объем требует приложения большего усилия и большей площади деформации. Повышение площади деформации повышает температуру внутри заготовки, таким образом, помимо температуры возникающей в результате трения, наибольшее влияние несет именно площадь деформации и среза приходящаяся на один режущий сегмент. При традиционном плоском шлифовании, происходит увеличение температуры в зоне резания в результате засаливания периферии инструмента и потери режущей способности.

Установлено, что прерывистое шлифование, благодаря увеличению и изменению геометрического исполнения режущей части, позволяет избежать сферичности засаливания режущего инструмента, что повышает процент перерезанных армирующих волокон, тем самым формируя более качественную поверхность. При традиционном плоском шлифовании, засаливание периферии инструмента приводит к повышению температуры в зоне обработки и влечет за собой разложение полимера, в свою очередь прерывистое шлифование, несмотря на сопоставимые температуры при высоких режимах обработки, за счет дополнительной торцевой поверхности сегмента принимает характер калибровки поверхности. Вступая в зону резания периферией сегмента, система подвергается сильному упругому отжатию ввиду засаливания режущего инструмента, в то же время засаливание носит обратно пропорциональную зависимость от длины сегмента. По истечению времени контакта сегмента в зону обработки входит незасаленный участок и обеспечивает хрупкое разрушение необработанных поверхностей.

Износ режущего инструмента, имеет

отличительные черты, ввиду неравномерного засаливания рабочей части сегментов. Плоское шлифование традиционным инструментом, при механической обработке шлифованием ПКМ сопровождается равномерным засаливанием инструмента и выходом его из строя и необходимости его правки. При этом прерывистое шлифование включает в себе три зоны износа каждого из сегментов. Первая зона характеризуется равномерным износом участка малой протяженности, где поры между абразивными частицами отсутствуют и заполнены отходами композита. Данная зона не позволяет обеспечить стабильность протекания резания материала. Вторая зона характеризуется снижением засаливания и увеличением размеров пор между частицами, что стимулирует возвращение режущей способности композита. Заключительная зона характеризуется нормализацией режущей способности сегмента. Условные разграничения сегмента прерывистого круга на зоны износа представлены на рис. 11.

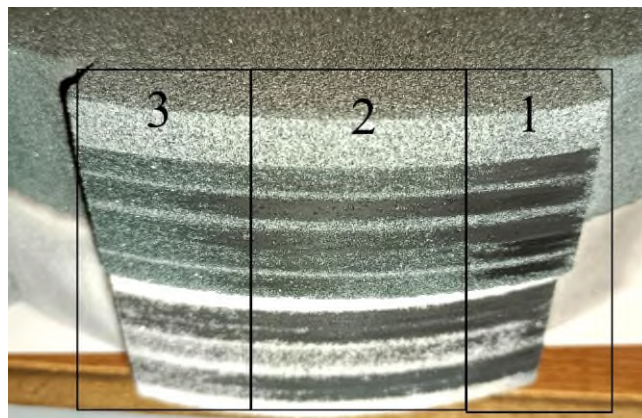


Рис. 11. Зоны износа сегментов прерывистых шлифовальных кругов:
1 – критический износ; 2 – переходная зона износа; 3 – режущая часть

Для повышения производительности процесса прерывистого шлифования необходимо экспериментально разработать методику расчета оптимальных длин сегментов прерывистых кругов, с целью повышения зоны резания и снижения зоны критического износа. Данные исследования позволят повысить контроль над качеством обработанной поверхности путем снижения ударных нагрузок на заготовку.

С учетом проведения полного факторного эксперимента [2] так же были разработаны математические модели описания зависимости параметра шероховатости и температуры верхних слоев заготовки от представленных факторов, для каждого режущего инструмента, принятого для проведения опытов. Полученные зависимости представлены в табл. 4.

4. Математическое описание влияния режимов обработки на температуру верхних слоев заготовки в процессе резания

Инструмент	Линейная математическая модель зависимости шероховатости поверхности Ra , мкм при традиционном плоском шлифовании	Линейная математическая модель зависимости температуры верхних слоев T , °C при традиционном плоском шлифовании
25A F60 K 7 V 35 2250	$Ra = 0,106175 + 1,8133t + 0,03307S$	$T = 41,675 - 33,5t - 0,625S + 4,5St$
64C F60 K 7 V35 2250	$Ra = - 0,1458 + 3,4275t + 0,0625S$	$T = 38,104 + 77,18t - 0,5308S + 9,132St$

Выводы

В ходе проведенных исследований определено, что основными положениями по применению прерывистого шлифования являются:

- снижение температуры в верхних слоях заготовки в диапазоне 10...20 %;
- повышение шероховатости обработанной поверхности в 1,5 раза;
- неравномерное засаливание периферии режущего сегмента.

На основании вышесказанного, в качестве рекомендаций к применению абразивной обработки выступают:

- глубина резания не более 0,15 мм и скорость подачи стола 5 м/мин на основании анализа качества обработанной поверхности и температуры в верхних слоях заготовки;
- при проектировании технологического процесса механической обработки ПКМ применение технологии абразивной обработки как прерывистым, так и сплошным инструментом рекомендуется в качестве финишной операции с предварительной лезвийной обработкой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Макаров В.Ф. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетнокосмической техники // Вестник ПНИПУ. 2015. Т. 17. № 2. С. 30–41.
2. Рубцов С.М. Полимерные волокнистые композиты в конструкции турбовентиляторного авиационного двигателя ПС-90А // Конверсия в машиностроении. 2007. № 3. С. 19–26.
3. Ярославцев В.М. Новые технологии повышения качества поверхностного слоя при резании волокнистых полимерных композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия Машиностроение. 2017. № 6. С.15-18.
4. Бондарь Е.В, Марков В.А. Точение стеклопластиков резцами со сменными многогранными пластинами // Обработка металлов

(Технология, оборудование, инструменты). 2009. №2. С.6–10.

5. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Инновационные технологии обработки полимерных композиционных материалов в машиностроении // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 8 (74). С. 36–42.

6. Ярославцев В.М. Совершенствование метода резания с дополнительным технологическим покрытием для чистовой обработки волокнистых композитов. // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. 2016. № 2, С. 196–209.

7. Макаров В.Ф., Волковский А.А., Сабирзянов А.И. Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 9. С. 40–48

8. Volkovskiy A.A., Makarov V.F. The study of grinding polymer composite material // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE: International Conference on Industrial Engineering. Челябинск, 2022. С. 548–555.

9. Козулько Н.В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18. № 2. С. 179–189.

10. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. Киев-Одесса: Вища-школа, 1986. 176 с.

REFERENCES

1. Makarov V.F. Investigation of the problems of mechanical processing of modern high-strength composite materials used for the production of parts for aviation and rocket and space technology. Bulletin of PNIU. 2015, Vol. 17, № 2. PP. 30–41.
2. Rubtsov, S.M. Polymeric fibrous composites in the design of PS-90A turbofan aircraft engine // Conversion in mechanical engineering. 2007, № 3, PP. 19–26.
3. Yaroslavtsev, V.M. New technologies for improving the quality of the surface layer when cutting

fibrous polymer composite materials. Vestnik MGTU im. Bauman. Series Engineering. 2017, № 6, PP.15-18.

4. Bondar E.V., Markov V.A. Turning of fiber-glass with cutters with replaceable polyhedral plates// Processing of metals (Technology, equipment, tools). 2009, №2, PP.6-10.

5. Zubarev, Yu.M., Priemyshev, A.V. Innovative technologies for the processing of polymer composite materials in mechanical engineering // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2017, №. 8 (74), PP. 36-42.

6. Yaroslavtsev V.M. Improvement of the cutting method with an additional technological coating for finishing fiber composites. // Science and education. MSTU im. N.E. Bauman. Electron. magazine. 2016, №2, PP. 196–209.

7. Makarov V.F., Volkovsky A.A., Sabirzyanov A.I. Improving the productivity and quality of pro-

cessing composite materials based on the choice and rational use of abrasive tools / V. F. Makarov, A.A. Volkovsky, A.I. Sabirzyanov // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, № 9, PP.40-48.

8. Volkovskiy A.A., Makarov V.F. THE STUDY OF GRINDING POLYMER COMPOSITE MATERIAL // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE: International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk, 2022, PP. 548-555.

9. Kazulko N.V. Mechanization of abrasive processing of parts made of polymer composite materials // Bulletin of the Don State Technical University, 2018, Vol. 18, № 2, PP. 179–189.

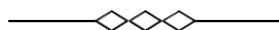
10. A.V. Yakimov. Intermittent grinding. / Kyiv-Odessa: - Vishcha-school: 1986, 176p.

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

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

Статья поступила в редакцию 08.12.2022; одобрена после рецензирования 15.12.2022; принята к публикации 28.12.2022.

The article was submitted 08.12.2022; approved after reviewing 15.12.2022; assepted for publication 28.12.2022.



Научная статья

УДК 621.91

doi:10.30987/2223-4608-2023-2-26-31

Моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната при различных режимах обработки

Александр Николаевич Унянин¹, д. т. н.,
Илназ Зеферович Димуhamетов², аспирант

^{1, 2} ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» г. Ульяновск, Россия

¹ a_un@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>

² iln-d@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Выполнено численное моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната при различных режимах обработки. Параметры фиксировали в различные моменты времени контакта зуба фрезы с заготовкой. Установлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования, в том числе сил и температур в зонах контакта стружки с зубом фрезы и зуба с заготовкой, в зависимости от элементов режима фрезерования. Установлено, что температуры в зоне контакта зуба с заготовкой выше, чем в зоне контакта зуба со стружкой. Выявлена закономерность распределения температур в поверхностном слое заготовки. Получены математические зависимости, описывающие взаимосвязь температур с элементами режима фрезерования.

Ключевые слова: режим обработки, моделирование, фрезерование, поликарбонат, температурное поле, температура, сила

Для цитирования: Унянин А.Н., Димуhamетов И.З. Моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната при различных режимах обработки // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 2 (140). – С. 26-31. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-26-31.

Original article

Modeling of technological parameters in the milling process of polycarbonate workpieces under various processing modes

Alexander N. Unyanin¹, Dr.Sc.Tech.,
Il'naz Z. Dimukhametov², postgraduate student
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
¹ a_un@mail.ru, ² iln-d@yandex.ru

Abstract. Based on the conducted experimental studies regarding the comparative quality analysis for treated surfaces in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials, the abrupt grinding performance criteria were determined and an advice list for abrasive processing of PCM was also made.

Keywords: abrupt grinding, abrasive processing of PCM, grinding, grinding temperature, surface roughness, delamination, blunting, cutting modes

For citation: Unyanin A.N., Dimukhametov I.Z. Modeling of technological parameters in the milling process of polycarbonate workpieces under various processing modes. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 26-31. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-26-31.

Поликарбонат является перспективным материалом, который, благодаря своим свойствам (самый прочный среди прозрачных пластиков, имеет высокую степень прозрачности и пожаробезопасный), все более широко используется для изготовления деталей машин и приборов, в частности, панелей приборов летательных аппаратов, судов и др. Однако низкая теплопроводность поликарбоната является причиной

малой интенсивности отвода теплоты из зоны механической обработки, а низкие температуры его разложения и плавления являются причиной появления тепловых дефектов обработанной поверхности. Поэтому после механической обработки заготовок из поликарбоната изменяются его оптические свойства, в том числе степень прозрачности.

Поликарбонат используется для изготовле-

ния деталей машин и приборов недавно, поэтому рекомендации, касающиеся его механической обработки, носят ориентировочный характер. Широко распространенным методом обработки заготовок деталей из поликарбоната является фрезерование цилиндрическими и концевыми фрезами. Влияние режима обработки на технологические параметры процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната, в том числе теплосиловую напряженность процесса, не установлено. Это затрудняет разработку рекомендаций по выбору условий и режима фрезерования.

Для расчета технологических параметров процесса фрезерования, в том числе сил резания и трения и температур при обработке заготовок деталей из поликарбоната использованы физические и математические модели, методики и программное обеспечение [1 – 4].

Модели позволяют в комплексе учесть расположение и взаимное перемещение отдельных источников тепловыделения (в зоне деформирования и в зонах контакта зуба фрезы со стружкой и заготовкой), наложение тепловых импульсов от отдельных зубьев, зависимость теплофизических свойств контактирующих объектов и механических свойств заготовки из поликарбоната от температуры, а также изменение глубины внедрения зуба в заготовку на траектории их контакта. Теплообмен является нестационарным, поскольку зубья вступают в контакт с заготовкой периодически. Все источники тепловыделения считаются двумерными, что не вносит существенных погрешностей в результаты расчета [2]. Процессы теплообразования рассматривали в сечении фрезы, перпендикулярном ее оси. Уравнения теплопроводности решали, используя численный метод конечных элементов.

Численное моделирование температурного поля выполнили для случая встречного фрезерования заготовки фрезой, изготовленной из твердого сплава Т5К10 диаметром 20 мм и имеющей пять зубьев, высоту профиля зуба, равную 4 мм, и передний угол $\gamma = 10^\circ$ [5].

При выборе для моделирования механических и теплофизических характеристик обрабатываемого материала ориентировались на характеристики поликарбоната: температура размягчения 220...230 °С; предел прочности при растяжении – 65...70 МПа; предел прочности при изгибе – 95 МПа; удельная теплоемкость – 1090...1255 Дж/(кг·К); теплопроводность – 0,20 Вт/(м·К); плотность – 1,20 г/см³ (при 20 °С).

Напряжение текучести обрабатываемого

материала в области деформирования, определяющее силы резания и трения, определяли как [6]

$$\sigma_{st} = \sigma_s \left(1 - \frac{T_g}{T_p}\right), \quad (1)$$

где σ_s – напряжение текучести материала заготовки при температуре 20 °С, Па; T_g – температура в области деформирования, °С; T_p – температура плавления обрабатываемого материала, °С. При выборе для численного моделирования параметра T_p ориентировались на температуру размягчения поликарбоната. Используемое программное обеспечение позволяет определить температуру в любой точке заготовки, в том числе и в области деформирования T_g . Температура T_g , рассчитанная в какой-либо момент времени, используется для расчета параметра σ_{st} в последующий момент.

Предел прочности поликарбоната примерно в десять раз ниже предела прочности большинства металлов, что позволяет прогнозировать меньшие силы резания и трения, мощности и плотности источников тепловыделения. Можно предположить, что низкие значения плотности и коэффициента теплопроводности (коэффициент теплопроводности поликарбоната в десятки раз ниже, чем у металлов) не позволят прогреться заготовке на значительную глубину. Плотности, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости материалов заготовки и фрезы в зависимости от температуры определяли, ориентируясь на справочные данные.

Варьировали элементами режима фрезерования: скорость резания $v = 8...15$ м/с; подача на зуб фрезы $s_z = 0,12...0,21$ мм; глубина резания $t = 0,5...1,0$ мм. План численного моделирования составлен по принципу многофакторного планирования экспериментов и включает в себя различные комбинации элементов режима (табл. 1).

Установлены закономерности изменения технологических параметров процесса фрезерования, в том числе сил и температур, в зависимости от продолжительности контакта зуба фрезы с заготовкой. Выявлено, что температуры достигают значительных величин в первые моменты времени контакта зуба фрезы с заготовкой и увеличиваются в последующие моменты времени. Максимальные температуры возникают в заключительный период времени контакта зуба с заготовкой. Поэтому в процессе численного моделирования технологические параметры фиксировали в последний момент времени контакта зуба с заготовкой и в предыдущий момент.

1. План численного моделирования

Номер эксперимента	Варьируемые параметры		
	Подача на зуб фрезы s_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/с	Глубина фрезерования t , мм
1	0,12	8	0,5
2	0,21	8	0,5
3	0,12	15	0,5
4	0,21	15	0,5
5	0,12	8	1
6	0,21	8	1
7	0,12	15	1
8	0,21	15	1

Длина траектории контакта l_k зуба фрезы с заготовкой зависит лишь от глубины фрезерования t и с ее увеличением в два раза увеличивается на 42 % (табл. 2). Максимальная глубина

внедрения зуба в заготовку $a_{\max}$ зависит от параметров s_z и t и увеличивается с увеличением этих параметров. Скорость резания v на параметр $a_{\max}$ влияния не оказывает.

2. Технологические параметры процесса фрезерования

Номер эксперимента по табл. 1	Длина траектории контакта зуба с заготовкой l_k , мм	Максимальная глубина внедрения зуба в заготовку $a_{\max}$, мкм	Максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l , мкм	Время контакта зуба с заготовкой τ_k , с
1	3,18	37,6	121	$37,4 \cdot 10^{-5}$
2	3,18	65,6	211	$37,4 \cdot 10^{-5}$
3	3,18	37,6	121	$20,7 \cdot 10^{-5}$
4	3,18	65,6	211	$20,7 \cdot 10^{-5}$
5	4,5	52,5	169	$52,7 \cdot 10^{-5}$
6	4,5	91,5	294	$52,7 \cdot 10^{-5}$
7	4,5	52,5	169	$30,5 \cdot 10^{-5}$
8	4,5	91,5	294	$30,5 \cdot 10^{-5}$

Длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l увеличивается с увеличением s_z с 0,12 до 0,21 мм на 74 %; при повышении глубины резания t в два раза параметр l возрастает на 40 %; скорость резания v на этот параметр влияния не оказывает.

При увеличении скорости резания v с 8 до 15 м/с время контакта зуба с заготовкой τ_k уменьшается на 38 % при $t = 0,5$ мм и на 42...47 % при $t = 1$ мм. Варьирование параметром t в пределах 0,5...1 мм приводит к росту τ_k на 41...47 %.

Результаты расчета технологических параметров процесса фрезерования при различных режимах обработки и в различные моменты времени контакта зуба фрезы с заготовкой представлены в табл. 3 – 5. В процессе численного моделирования число фиксированных моментов времени контакта округляется до целого числа, поэтому между последним моментом времени контакта зуба с заготовкой τ по табл. 3 – 5 и параметром τ_k по табл. 2 имеются незначительные расхождения вследствие этого округления.

3. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима

Номер эксперимента	Время контакта зуба с заготовкой τ , с	Глубина внедрения зуба в заготовку a_m , мкм	Длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l_1 , мкм	Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба F_1 , Н	Сила трения зуба о заготовку F_2 , Н	Главная составляющая силы резания P_z , Н
1	$30,3 \cdot 10^{-5}$	28,8	82,2	3,69	0,45	4,73
	$37,4 \cdot 10^{-5}$	35,6	101,5	4,89	0,48	6,17
2	$23,7 \cdot 10^{-5}$	32,1	91,6	4,06	0,44	5,16
	$36,3 \cdot 10^{-5}$	49,2	140,0	6,80	0,48	8,39
3	$12,4 \cdot 10^{-5}$	22,1	63,2	2,79	0,44	3,67
	$20,1 \cdot 10^{-5}$	35,7	102,0	4,92	0,48	6,21
4	$9,2 \cdot 10^{-5}$	28,5	81,3	3,65	0,45	4,69
	$20,7 \cdot 10^{-5}$	64,1	182,9	8,87	0,48	10,87
5	$40,3 \cdot 10^{-5}$	37,7	107,7	4,76	0,44	5,97
	$52,7 \cdot 10^{-5}$	49,4	140,9	6,81	0,48	8,42
6	$31,6 \cdot 10^{-5}$	42,1	120,0	5,37	0,44	6,70
	$52,6 \cdot 10^{-5}$	70,1	200,1	9,70	0,48	11,86
7	$14,9 \cdot 10^{-5}$	26,1	74,6	3,30	0,44	4,26
	$28,2 \cdot 10^{-5}$	49,4	140,9	6,82	0,48	8,44
8	$13 \cdot 10^{-5}$	39,6	113,2	5,16	0,45	6,46
	$30,5 \cdot 10^{-5}$	92,5	264,1	12,85	0,48	15,64

Примечание: F_1 , F_2 , P_z – силы, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы

4. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима

Номер эксперимента	Время контакта зуба с заготовкой τ , с	Температура деформируемого слоя материала заготовки T_d , К	Предел прочности материала заготовки σ_{st} , МПа	Плотность источника тепловыделения, Вт/м ²		
				в зоне деформирования g_d	в зоне контакта стружки с зубом g_1	в зоне контакта зуба с заготовкой g_2
1	$30,3 \cdot 10^{-5}$	340	54,4	$3,21 \cdot 10^8$	$4,37 \cdot 10^8$	$8,64 \cdot 10^8$
	$37,4 \cdot 10^{-5}$	300	59,1	$3,46 \cdot 10^8$	$4,69 \cdot 10^8$	$9,28 \cdot 10^8$
2	$23,7 \cdot 10^{-5}$	347	53,6	$3,18 \cdot 10^8$	$4,31 \cdot 10^8$	$8,54 \cdot 10^8$
	$36,3 \cdot 10^{-5}$	299	59,2	$3,49 \cdot 10^8$	$4,07 \cdot 10^8$	$9,30 \cdot 10^8$
3	$12,4 \cdot 10^{-5}$	349	53,3	$5,90 \cdot 10^8$	$8,06 \cdot 10^8$	$15,94 \cdot 10^8$
	$20,1 \cdot 10^{-5}$	300	59,1	$6,05 \cdot 10^8$	$8,80 \cdot 10^8$	$17,40 \cdot 10^8$
4	$9,2 \cdot 10^{-5}$	339	54,5	$6,03 \cdot 10^8$	$8,20 \cdot 10^8$	$16,20 \cdot 10^8$
	$20,7 \cdot 10^{-5}$	297	59,5	$6,60 \cdot 10^8$	$8,85 \cdot 10^8$	$17,05 \cdot 10^8$
5	$40,3 \cdot 10^{-5}$	349	53,3	$3,17 \cdot 10^8$	$4,30 \cdot 10^8$	$8,50 \cdot 10^8$
	$52,7 \cdot 10^{-5}$	299	59,3	$3,50 \cdot 10^8$	$4,70 \cdot 10^8$	$9,30 \cdot 10^8$
6	$31,6 \cdot 10^{-5}$	342	54,0	$3,20 \cdot 10^8$	$4,35 \cdot 10^8$	$8,60 \cdot 10^8$
	$52,6 \cdot 10^{-5}$	297	59,0	$3,53 \cdot 10^8$	$4,07 \cdot 10^8$	$9,30 \cdot 10^8$
7	$14,9 \cdot 10^{-5}$	348	53,4	$5,90 \cdot 10^8$	$8,07 \cdot 10^8$	$15,60 \cdot 10^8$
	$28,2 \cdot 10^{-5}$	297	59,5	$6,60 \cdot 10^8$	$8,84 \cdot 10^8$	$17,50 \cdot 10^8$
8	$13,0 \cdot 10^{-5}$	332	55,4	$6,14 \cdot 10^8$	$8,32 \cdot 10^8$	$16,50 \cdot 10^8$
	$30,5 \cdot 10^{-5}$	295	59,8	$6,71 \cdot 10^8$	$8,88 \cdot 10^8$	$17,57 \cdot 10^8$

5. Температуры при различных элементах режима

Номер эксперимента	Время контакта зуба с заготовкой τ , с	Средняя температура в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 , К	Средняя температура в зоне контакта стружки с зубом T_1 , К	Температура на вершине зуба фрезы T_E , К	Температура заготовки T_3 , К на расстоянии от обрабатываемой поверхности, мкм	
					25	50
1	$30,3 \cdot 10^{-5}$	514	503	563	300,0	293,8
	$37,4 \cdot 10^{-5}$	529	519	586	303,5	293,9
2	$23,7 \cdot 10^{-5}$	535	505	602	293,9	293,4
	$36,3 \cdot 10^{-5}$	566	544	638	295,8	293,5
3	$12,4 \cdot 10^{-5}$	655	591	758	294,5	293,3
	$20,1 \cdot 10^{-5}$	702	652	814	302,0	293,4
4	$9,2 \cdot 10^{-5}$	699	598	905	296,0	293,6
	$20,7 \cdot 10^{-5}$	824	713	1021	298,0	293,1
5	$40,3 \cdot 10^{-5}$	554	541	614	296,1	293,3
	$52,7 \cdot 10^{-5}$	576	567	644	299,0	293,4
6	$31,6 \cdot 10^{-5}$	595	532	653	294,1	293,1
	$52,6 \cdot 10^{-5}$	602	581	690	295,0	293,2
7	$14,9 \cdot 10^{-5}$	737	639	885	293,1	293,1
	$28,2 \cdot 10^{-5}$	814	736	969	297,7	293,1
8	$13,0 \cdot 10^{-5}$	913	679	1163	293,1	293,0
	$30,5 \cdot 10^{-5}$	1057	825	1287	294,0	293,0

Рассчитывали силы трения и силу резания, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы. Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба фрезы F_1 увеличивается с увеличением S_z на 39...80 % при $t = 0,5$ мм и на 42...88 % при $t = 1$ мм, т.е. при большем значении глубины t параметр F_1 изменяется в большей степени. Параметр s_z не оказывает влияния на силу трения зуба о заготовку F_2 .

Главная составляющая силы резания P_z увеличивается с ростом s_z на 36...75 % при $t = 0,5$ мм и на 41...85 % при $t = 1$ мм, т.е. так же, как и сила трения F_1 , изменяется в большей степени при большей глубине фрезерования. При увеличении скорости резания v сила трения F_1 увеличивается в последний и снижается

в предпоследний момент времени контакта зуба с заготовкой.

Сила резания P_z при увеличении скорости резания v также, как и сила трения F_1 снижается в предпоследний момент времени контакта зуба с заготовкой и увеличивается в последний момент, причем в большей степени – при подаче $s_z = 0,21$ мм/зуб.

Увеличение глубины фрезерования t приводит к увеличению сил F_1 и P_z . Все вышеперечисленные параметры (a_{max} , l_1 , F_1 , F_2 и P_z) увеличиваются с увеличением времени τ контакта зуба с заготовкой.

Повышение значения подачи на зуб фрезы s_z приводит к незначительному уменьшению значения температуры деформируемого слоя

материала заготовки T_g , что можно объяснить тем, что при увеличении скорости перемещения теплового источника теплота не успевает распространиться вглубь заготовки из поликарбоната, имеющего низкий коэффициент теплопроводности. При увеличении скорости резания v температура деформируемого слоя также незначительно снижается. Температура T_g несколько снижается и при увеличении глубины резания, что объясняется тем, что материал заготовки на большей глубине нагревается незначительно вследствие малого значения коэффициента теплопроводности поликарбоната.

Значение предела текучести материала заготовки σ_{St} изменяется противоположно изменению температуры T_g . При варьировании режимом этот параметр изменяется незначительно, поэтому на силы трения и силу резания его изменение существенного влияния не оказывает, что следует из табл. 4.

Температура T_g в последний момент работы зуба непосредственно перед выходом его из зоны контакта с заготовкой значительно ниже, чем в предшествующий момент времени. Причиной этого является то, что перед выходом зуба из зоны контакта он деформирует материал заготовки, прогретый в результате работы предшествующих зубьев в меньшей степени. Интервал изменения температуры T_g в предпоследний момент времени работы зуба шире, чем в последний момент, поэтому при изменении элементов режима σ_{St} в большей степени изменяется в этот момент времени.

Плотности всех источников тепловыделения незначительно увеличиваются с ростом подачи и глубины резания. Выше было отмечено, что силы F_1 и P_z существенно увеличиваются с увеличением этих параметров. Однако при увеличении параметров s_z и t увеличиваются и площади зоны деформирования и зоны контакта стружки с передней поверхностью зуба. Поскольку плотности тепловыделений обратно пропорциональны площадям, то изменение параметров s_z и t влияет на изменения плотностей

тепловыделения незначительно.

Скорость резания v оказывает существенное влияние на плотности всех источников тепловыделения. В частности, при увеличении v параметр q_g увеличивается на 88...89 %, т.е. примерно пропорционально степени увеличения v . Средние температуры в зоне контакта стружки с передней поверхностью зуба T_1 , зуба с заготовкой T_2 и температура на вершине зуба фрезы T_E увеличиваются с ростом всех трех варьируемых элементов режима – v , s_z и t . Температура в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 на 2...8 % выше, чем температура в зоне контакта зуба со стружкой T_1 . Значительные температуры (1021...1287 К) возникают на вершине зуба при $v = 15$ м/с и $s_z = 0,21$ мм. Эти температуры близки к температуре теплостойкости твердого сплава Т5К10.

Силы трения и резания и мощности источников тепловыделения при обработке заготовок из поликарбоната на порядок ниже, чем при фрезеровании заготовок из металлов [1, 2, 7], что объясняется более низким пределом прочности этого материала и низкой температурой размягчения.

Вследствие низкого коэффициента теплопроводности поликарбоната, как и следовало ожидать, материал заготовки прогревается на незначительную глубину. Максимальная температура заготовки на глубине 25 мкм имеет место при режиме, соответствующем эксперименту №1 по табл. 1 в заключительный момент времени контакта зуба с заготовкой $\tau = 37,4 \cdot 10^{-5}$ с и составляет 303,5 К (30,5 °С). В табл. 6 представлены результаты расчета температур заготовки на глубине 15 мкм при этом режиме в различные моменты времени контакта зуба с заготовкой. В заключительный момент времени контакта ($\tau = 37,4 \cdot 10^{-5}$ с) температура составляет 314,7 К (41,7 °С), что значительно ниже температуры размягчения поликарбоната. Следовательно, вследствие низкой теплопроводности поликарбоната тепловой поток не проникает в глубинные слои заготовки.

6. Температура заготовки на расстоянии 15 мкм от обрабатываемой поверхности

Время контакта зуба с заготовкой τ , с					
$0,89 \cdot 10^{-5}$	$4,45 \cdot 10^{-5}$	$8,90 \cdot 10^{-5}$	$18,69 \cdot 10^{-5}$	$30,3 \cdot 10^{-5}$	$37,4 \cdot 10^{-5}$
298,7	298,8	299,0	299,5	312,5	314,7

Ниже представлены зависимости, позволяющие рассчитать температуры в заключи-

тельный момент времени контакта зуба с заготовкой:

$$T_1 = 299,1 + 639,68 \cdot s_z + 18,571 \cdot v + 216,57 \cdot t - 61,9 \cdot s_z \cdot v - 1362 \cdot s_z \cdot t - 13,9 \cdot v \cdot t + 139,68 \cdot s_z \cdot v \cdot t; \quad (2)$$

$$T_2 = 223,9 + 1141,3 \cdot s_z + 31,095 \cdot v + 272 \cdot t - 141,3 \cdot s_z \cdot v - 2400 \cdot s_z \cdot t - 30,68 \cdot v \cdot t + 355,56 \cdot s_z \cdot v \cdot t; \quad (3)$$

$$T_E = 288,95 + 725,4 \cdot s_z + 21,381 \cdot v + 327,52 \cdot t - 36,51 \cdot s_z \cdot v - 3327 \cdot s_z \cdot t - 28,19 \cdot v \cdot t + 415,87 \cdot s_z \cdot v \cdot t. \quad (4)$$

Зависимости, позволяющие рассчитать температуры в момент времени контакта,

предшествующий заключительному:

$$T_{1-1} = 307,57 + 438,1 \cdot s_z + 14,429 \cdot v + 161,9 \cdot t - 4,762 \cdot s_z \cdot v - 1235 \cdot s_z \cdot t - 4,571 \cdot v \cdot t + 123,81 \cdot s_z \cdot v \cdot t; \quad (5)$$

$$T_{2-1} = 222,95 + 1130,2 \cdot s_z + 24,381 \cdot v + 377,05 \cdot t - 74,6 \cdot s_z \cdot v - 3597 \cdot s_z \cdot t - 31,71 \cdot v \cdot t + 419,05 \cdot s_z \cdot v \cdot t; \quad (6)$$

$$T_{E-1} = 358,86 + 161,9 \cdot s_z + 11,476 \cdot v + 266,86 \cdot t - 60,317 \cdot s_z \cdot v - 3105 \cdot s_z \cdot t - 16,86 \cdot v \cdot t + 371,43 \cdot s_z \cdot v \cdot t. \quad (7)$$

Используя эти уравнения, можно рассчитать режим обработки, при котором температуры в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой не превысят допустимое значение.

Выводы:

1. Установлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования, в том числе сил и температур в зонах контакта стружки с зубом фрезы и зуба с заготовкой, в зависимости от элементов режима фрезерования.
2. Установлено, что температуры в зоне контакта зуба с заготовкой выше, чем в зоне контакта зуба со стружкой.
3. Выявлена закономерность распределения температур в поверхностном слое заготовки.
4. Получены математические зависимости, описывающие взаимосвязь температур с элементами режима фрезерования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Унянин А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 220–235.
2. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
3. Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 56–61.
4. Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. Практические расчеты параметров резания при точении // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 67–70.
5. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А. Н. Шевченко и др. / Под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение, Ленин

градское отделение, 1987. 846 с.

6. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.

7. Унянин А.Н., Семдянкин И.В. Моделирование температурного поля при фрезеровании заготовок тонкостенных деталей // Инновации в машиностроении: сборник трудов 12-й междунар. научно-практ. конф. Новосибирск: Из-во НГТУ, 2021. С. 59–66.

REFERENCES

1. Unyanin, A.N. Analytical study of the temperature field during milling with the imposition of ultrasonic vibrations / A.N. Unyanin // Vestnik RGATU im. P.A. Solovyov. – 2017. – No. 2 (41). – S. 220 – 235.
2. Reznikov, A.N. Thermal processes in technological systems / A.N. Reznikov, L.A. Reznikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1990. – 288 p.
3. Vorontsov, A.L. Development of a new theory of cutting. Mathematical description of the formation of chips of various types, pulsations of cutting forces and parameters of contact between the machined surface of the workpiece and the rear surface of the cutter / A.L. Vorontsov, N.M. Sultan-Zade, A.Yu. Albagachiev // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2008. – No. 7. – P. 56 – 61.
4. Vorontsov, A.L. Development of a new theory of cutting. Practical calculations of cutting parameters during turning / A.L. Vorontsov, N.M. Sultan-Zade, A. Yu. Albagachiev // Vestnik mashinostroyeniya. – 2008. – No. 9. – P. 67 – 70.
5. Toolmaker's Handbook / I.A. Ordinartsev, G.V. Filippov, A. N. Shevchenko and others / Ed. ed. I.A. Ordinartseva. – L. : Mashinostroyeniye, Leningrad branch, 1987. – 846 p.
6. Vasin, S.A. Cutting materials: Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting: a textbook for technical universities / S.A. Vasin, A.S. Vereshchak, V.S. Kushner. – M. : Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2001. – 448 p.
7. Unyanin, A.N. Modeling of the temperature field during milling blanks of thin-walled parts / A.N. Unyanin, I.V. Semdyankin. – Innovations in mechanical engineering: collection of works of the 12th int. scientific and practical. conf. – Novosibirsk: Iz-vo NSTU, 2021. – P. 59 – 66.

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

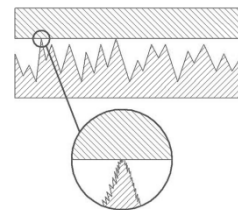
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.12.2022; одобрена после рецензирования 29.12.2022; принята к публикации 11.01.2023.

The article was submitted 20.12.2022; approved after reviewing 29.12.2022; assepted for publication 11.01.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №2 (140). С. 32-39.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №2 (140). P. 32-39.

Научная статья
УДК 539.621
doi:10.30987/2223-4608-2023-2-32-39

Обобщённый закон внешнего трения скольжения твёрдых тел

Александр Джалюльевич Бреки^{1,2}, д.т.н.

¹ Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

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

Аннотация. Предложена к рассмотрению математическая модель, описывающая закон внешнего трения скольжения с учётом изменений состояний скользящего контакта. Реализовано обобщение классических линейных моделей внешнего трения посредством введения дополнительных слагаемых, учитывающих переходы к новым условиям фрикционного взаимодействия. Разработанная математическая модель позволяет аналитически описать принципиальную схему изменения классического коэффициента трения в зависимости от нагрузки Б.И. Костецкого и дополнить её.

Ключевые слова: обобщённый закон трения, математическая модель, трение скольжения, переходный процесс, интеграл Ферми-Дирака

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. Обобщённый закон внешнего трения скольжения твёрдых тел // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2023. – № 2 (140). – С. 32-39. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-32-39.

Original article

Generalized law of contact gliding friction of solids

Alexander D. Breki^{1,2}, Dr.Sc.Tech.

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

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

Abstract. A mathematical model describing the law of contact gliding friction, taking into account changes in the sliding contact states, is proposed for consideration. The generalization of classical linear models of contact friction is carried out by putting in more additive components allowing for new state transitions of frictional interaction. The developed mathematical model makes it possible to give analytic description of the schematic diagram of classical slip coefficient change depending on the load of B.I. Kostetsky and allows adding to.

Keywords: generalized friction law, mathematical model, sliding friction, transition, Fermi-Dirac integral

Acknowledgments: The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation (RSF) in the priority area of the Foundation's activities «Conducting fundamental scientific research and exploratory research by individual scientific groups» within the scientific project: «Application of digital modeling and big data to improve the efficiency of mechanical processing of titanium blades of steam turbines and their operation in conditions of impingement corrosion» No. 22-19-00178.

For citation: Breki A.D. Generalized law of contact gliding friction of solids. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 32-39. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-32-39.

Начало исследованию закономерностей внешнего трения скольжения положил великий итальянский учёный и изобретатель Леонардо да Винчи (1508 г.). Он установил следующую зависимость силы трения твёрдых тел от нормальной силы [1]:

$$F_f = \frac{F_N}{4} = f_L \cdot F_N, \quad (1)$$

где F_f – сила внешнего трения; F_N – нормальная сила, прижимающая два твёрдых тела; f_L – средний коэффициент трения для различных твёрдых тел по Леонардо да Винчи, соответствующий тому комплексу условий, которые им использовались.

Далее (1699 г.), французский механик и физик Гийом Амонтон, предложил более общую зависимость, связывающую силу трения при относительном перемещении двух тел с нормальной нагрузкой, прижимающей эти тела друг к другу [2]:

$$F_f = f \cdot F_N, \quad (2)$$

где $f = F_f / F_N = \text{const}$ – коэффициент трения, показывающий долю возникающей силы трения скольжения от нормальной силы при относительном движении контактирующих твёрдых тел.

Французский физик Шарль Кулон (1778 г.) предложил другой вариант математической мо-

дели внешнего трения скольжения, учитывающей адгезионное взаимодействие поверхностей твёрдых тел [3]:

$$F_f = \frac{F_N}{f_C} + F_{fA}, \quad (3)$$

где F_{fA} – адгезионная составляющая силы внешнего трения; f_C – коэффициент трения по Шарлю Кулону. Справедливо следующее равенство:

$$\frac{dF_f}{dF_N} = \frac{1}{f_C} = f_D, \quad (4)$$

где f_D – дифференциальный коэффициент трения, выражающий интенсивность изменения силы трения с ростом нагрузки, соответственно:

$$F_f = f_D \cdot F_N + F_{fA}. \quad (5)$$

При этом коэффициент трения равен:

$$f = \frac{F_f}{F_N} = f_D + \frac{F_{fA}}{F_N}, \quad (6)$$

т. е. меняется в зависимости от нагрузки по закону гиперболического типа и приближается к дифференциальному коэффициенту трения с ростом нормальной нагрузки $f_D = \lim_{F_N \rightarrow \infty} f$ (рис. 1, а).

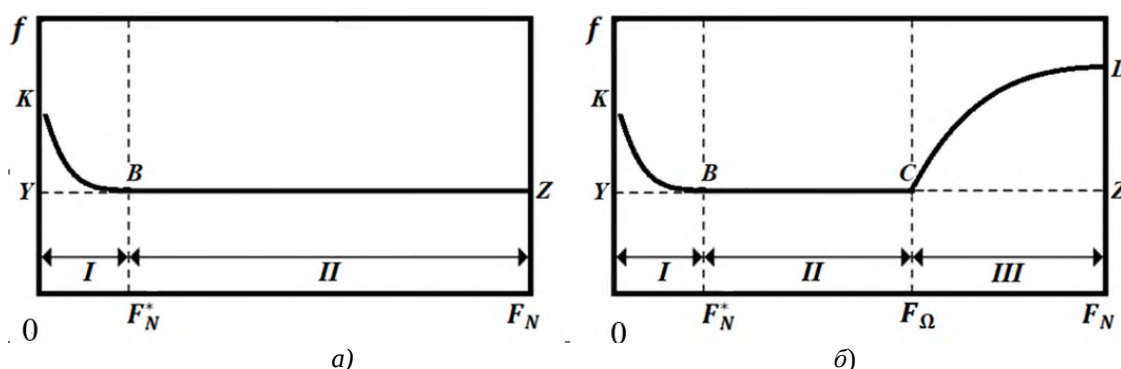


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки:

а – при соблюдении закона (5); б – при отклонении от закона (5), начиная с некоторой нагрузки [4]

Линия YZ выражает соблюдение закона (2), а линия KBZ является графиком (6) и выражает соблюдение двучленного закона трения (5), что показано на рис. 1, а.

Согласно крупному обобщению, сделанному Б.И. Костецким на основе анализа экспериментальных результатов большого количества авторов, при определённых значениях нормальной нагрузки для разных материалов и комплек-

сов условий, возникают отклонения от гиперболического закона изменения коэффициента трения (рис. 1, б) [4].

Зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки по Б.И. Костецкому имеет три характерных участка [4]:

I – переходный участок (данный участок соответствует приспособляемости поверхностей трения, которая в инженерной практике обычно

называется приработкой);

II – стационарный участок, соответствующий нормальному режиму работы узла трения, при котором реализуется окислительный износ. Нормальный режим характеризуется стабильным устойчивым коэффициентом трения с постоянным средним значением и допустимым (минимальным) износом, реализующимся за счёт образования прочных вторичных структур на поверхностях трения; диапазон нормального режима, определяемый величинами давления и коэффициента трения, может изменяться в зависимости от условий трения;

III – участок повреждаемости (нижняя граница участка повреждаемости определяется ве пропахиванию и другим паталогическим процессам различной интенсивности: данные про-

цессы характеризуются большими колебаниями мичиной критического давления, превышение которого приводит к схватыванию, смятию, силы трения и интенсивным износом).

С другой стороны, экспериментальные результаты различных исследователей показывают [7 – 15 и др.], что отклонения от двучленного закона трения при достижении некоторой нормальной силы выражаются в форме изгибов линейных графиков зависимости силы трения от нагрузки [5, 6]. То есть от нулевой нагрузки график силы трения изменяется по закону (5) (рис. 2, а), а затем при достижении некоторой нагрузки начинает преломляться и вновь изменяется линейно, но под другим углом к оси абсцисс (рис. 2, б) [5, 6].

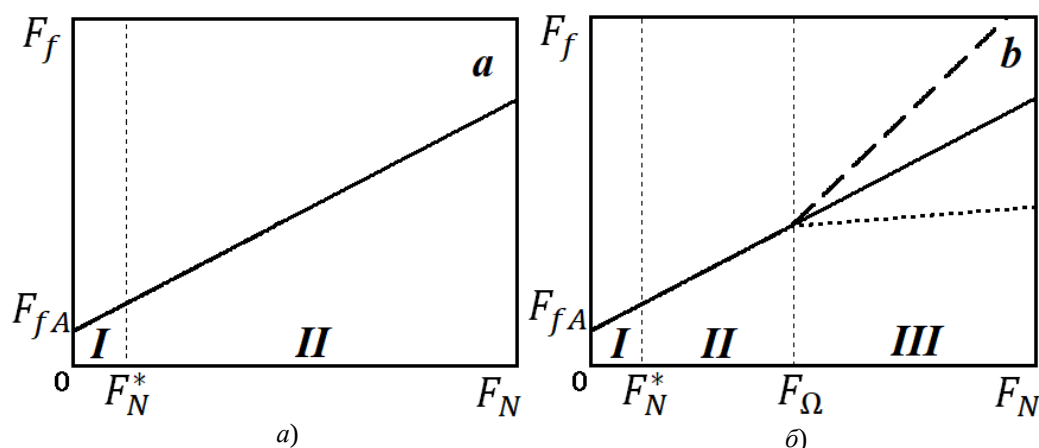


Рис. 2. Зависимость силы трения от нормальной нагрузки:

а – при соблюдении закона (5); б – при отклонении от закона (5), начиная с некоторой нагрузки [5, 6]

Следует отметить, что само наличие участка повреждаемости III, выявленного Б.И. Костецким, не опровергает справедливости (6), а соответственно и (5) до некоторого критического давления (нагрузки). Соответственно, математическую модель закона (5) необходимо дополнить таким образом, чтобы новая полученная модель совместно описывала бы все три участка изменения коэффициента трения и сохраняла бы при этом справедливость модели (5), как частного случая.

Анализ «специальных функций», используемых в различных разделах математики и физики, показал, что для дополнения математической модели (5) наиболее подходит использование интегралов Ферми-Дирака [16]:

$$F_j(x) = \frac{1}{\Gamma(j+1)} \int_0^{\infty} \frac{\xi^j}{1 + \exp(\xi - x)} d\xi, \quad (7)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция; j – порядок (индекс) интеграла. В атомной физике употребительны интегралы Ферми-Дирака целого и полуцелого индексов [17]. Для описания наблюдаемых отклонений от закона (5) подходит интеграл нулевого порядка (индекса), единственный который берётся в элементарных функциях [17]:

$$F_0(x) = \frac{1}{\Gamma(1)} \int_0^{\infty} \frac{1}{1 + \exp(\xi - x)} d\xi = \ln(1 + \exp(x)). \quad (8)$$

Отметим, что возможно использование и интеграла Ферми-Дирака порядка 0,5 и 1,0, однако они не берутся в элементарных функциях и необходимо использовать их приближения. Используя (8), введём следующую функцию от нормальной нагрузки:

$$F_{\Delta}(F_N) = \frac{\Delta f_D}{\psi_N} \cdot F_0(\psi_N(F_N - F_{\Omega})) = \frac{\Delta f_D}{\psi_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_N(F_N - F_{\Omega}))). \quad (9)$$

Графики функции (9), при различных значениях параметров приведены на рис. 3.

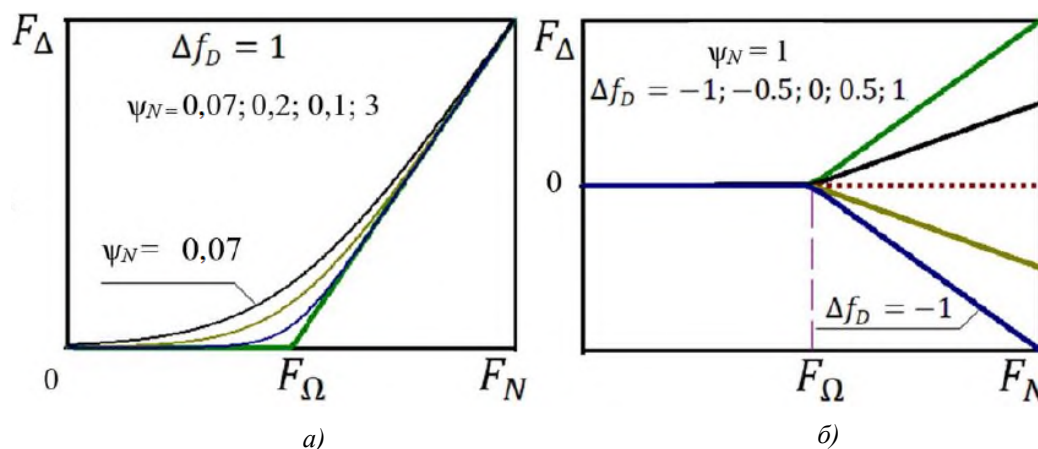


Рис. 3. Графики функции (9):

а – при изменении параметра ψ_N ; б – при изменении параметра Δf_D

При неограниченном увеличении параметра ψ_N график (9) стремится к ломаной линии, а при небольших значениях две линии, близкие к прямым, соединяются дугообразной кривой, что показано на рис. 3, а. При увеличении модуля (абсолютной величины) параметра Δf_D (см. рис. 3, б) происходит приращение угла между осью абсцисс и отклоняющейся линией. При неограниченном увеличении обоих параметров отклоняющаяся линия становится перпендикулярной оси абсцисс в точке F_{Ω} .

Таким образом, прибавляя к функции (5) функцию (9) мы получаем зависимость, графики которой показаны на рис. 2, б.

Согласно адгезионно-деформационной (молекулярно-механической) теории трения, сила трения складывается из двух составляющих [12, с. 220]:

$$F_f = F_{fD} + F_{fA}, \quad (10)$$

где F_{fD} – деформационная составляющая силы

внешнего трения; F_{fA} – адгезионная составляющая силы внешнего трения.

Деформационная составляющая силы трения равна [12, с. 214]:

$$F_{fD} = \beta_d \cdot F_N, \quad (11)$$

где β_d – деформационная составляющая коэффициента трения (в нашем обозначении).

Адгезионная составляющая силы трения равна [12, с. 223]:

$$F_{fA} = \tau_{fA0} \cdot A_r + \beta_a \cdot F_N = \beta_a \cdot F_N + F_{fA0}, \quad (12)$$

где τ_{fA0} – сдвиговая прочность адгезионной составляющей трения при нулевой нагрузке; A_r – фактическая площадь контакта; β_a – пьезокоэффициент адгезионной составляющей трения, F_{fA0} – адгезионная составляющая силы внешнего трения при нулевой нагрузке.

Подставляя (11) и (12) в (10) получим:

$$F_f = \beta_d \cdot F_N + \beta_a \cdot F_N + F_{fA0} = (\beta_d + \beta_a) \cdot F_N + F_{fA0}. \quad (13)$$

Из сравнения (13) и (5) видно, что второе слагаемое (13) выражает адгезионную составляющую только при нулевой нагрузке, а дифференциальный коэффициент трения соответственно равен:

$$f_D = \beta_d + \beta_a. \quad (14)$$

Соответственно можно записать:

$$F_f = (\beta_d + \beta_a) \cdot F_N + F_{fA0} = f_D \cdot F_N + F_{fA0}. \quad (15)$$

Законы (15) и (5) отличаются принципиально с точки зрения интерпретации получаемых экспериментальных результатов, однако математически при прибавлении (9) к (15) мы

также получаем зависимость, графики которой показаны на рис. 2, б. Поскольку закон (12) подтверждён многочисленными опытами И.В. Крагельского с сотрудниками, то мы принимаем справедливость (15).

$$F_f = f_{D0} \cdot F_N + F_{fA0} + \frac{\Delta f_D}{\psi_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_N (F_N - F_\Omega))), \quad (16)$$

где f_{D0} – начальный дифференциальный коэффициент трения; Δf_D – полное приращение дифференциального коэффициента трения при изменении состояния фрикционного контакта; ψ_N – параметр, характеризующий интенсивность приращения дифференциального коэффициента трения; F_Ω – значение нормальной нагрузки, со-

ответствующее максимальной интенсивности изменения дифференциального коэффициента трения.

Дифференцируя (16) получаем зависимость дифференциального коэффициента трения от нормальной нагрузки [5, 6]:

$$f_D = \frac{dF_f}{dF_N} = f_{D0} + \frac{\Delta f_D}{1 + \exp(-\psi_N (F_N - F_\Omega))}. \quad (17)$$

Частичное приращение дифференциального коэффициента трения:

$$\Delta f_{Dp} = f_D - f_{D0}. \quad (18)$$

Разделив (16) на F_N получаем зависимость коэффициента трения (классического) от нормальной нагрузки [5, 6]:

$$f = f_{D0} + \frac{F_{fA0}}{F_N} + \frac{\Delta f_D}{\psi_N \cdot F_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_N (F_N - F_\Omega))). \quad (19)$$

Графики зависимостей (17) и (19) при различных значениях параметров приведены

на рис. 4.

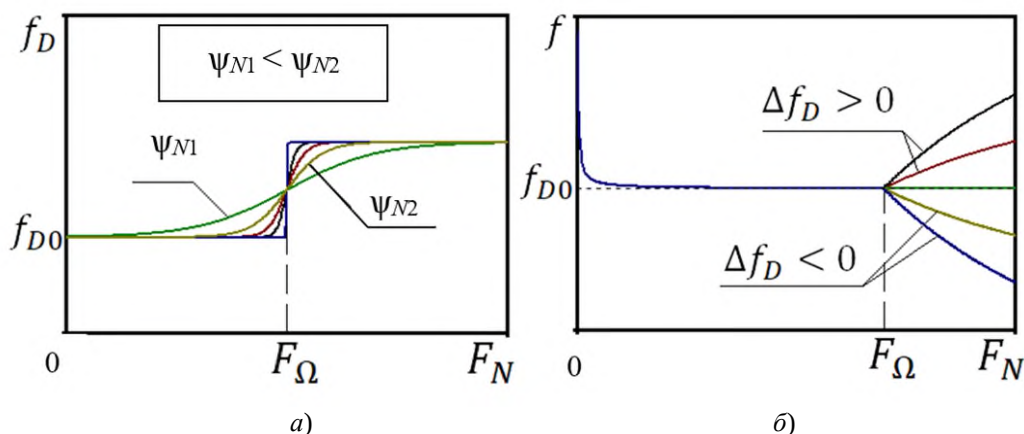


Рис. 4. Графики функций:

а – (17) при изменении параметра ψ_N ; б – (19) при изменении параметра Δf_D

С увеличением параметра ψ_N длина интервала значений нормальной нагрузки $\Delta F_{N\delta}$, на котором реализуется приращение Δf_D , уменьшается, как показано на рис. 4, а. Таким образом, параметр ψ_N обратно пропорционален величине $\Delta F_{N\delta}$.

Здесь можно по аналогии с переходным процессом [18], ввести понятие фрикционного перехода как изменения трибологической ха-

рактеристики, между двумя соседними стационарными состояниями за интервал приращения воздействующего фактора, короткий по сравнению с полной рассматриваемой шкалой его варьирования. В данном случае имеем фрикционный переход по нагрузке (см. рис. 4, а). По аналогии с теорией систем автоматического управления (САУ) примем, что фрикционный переход считается завершённым, если выполня-

ется условие [19]:

$$|\Delta f_{Dp}(F_N) - \Delta f_D| \leq \varepsilon_f, \quad (20)$$

где ε_f – наперёд заданное положительное число. Примем как в САУ $\varepsilon_f = (0,01 \dots 0,05) \Delta f_D$, т. е. фрикционный переход считаем закончившимся, когда Δf_{Dp} отличается от своего установившегося значения не более чем на 1...5 % [19].

Выразим параметр, характеризующий интенсивность приращения дифференциального

$$\psi_N = -\frac{\ln\left(\frac{\Delta f_D}{0,99\Delta f_D} - 1\right)}{F_{Np} - F_\Omega} \cong -\frac{\ln(0,01)}{F_{Np} - F_\Omega} = \frac{(2/\lg e)}{F_{Np} - F_\Omega}, \quad (22)$$

где $1/\lg(e)$ – математическая константа, называемая модулем перехода от десятичных логарифмов к натуральным. Очевидно, что (см. рис. 4, а):

$$F_{Np} - F_\Omega = \frac{\Delta F_{Nt}}{2}. \quad (23)$$

Подставляя (23) в (22) окончательно полу-

коэффициента трения из (17):

$$\psi_N = -\frac{\ln\left(\frac{\Delta f_D}{\Delta f_{Dp}} - 1\right)}{F_N - F_\Omega}. \quad (21)$$

Для большей точности предположим $\varepsilon_f = 0,01\Delta f_D$, тогда $\Delta f_{Dp} = 0,99\Delta f_D$, а этому значению будет соответствовать нагрузка F_{Np} , тогда (21) примет вид:

$$\psi_N \cong \frac{4}{\Delta F_{Nt} \cdot \lg e} = \frac{4 \cdot \ln 10}{\Delta F_{Nt}}. \quad (24)$$

чим, что параметр ψ_N связан с ΔF_N следующим образом:

Подставляя (24) в (16) получим:

$$F_f = f_{D0} \cdot F_N + F_{fA0} + \frac{\Delta f_D \cdot \Delta F_{Nt}}{4 \cdot \ln 10} \cdot \ln \left(1 + \exp \left(\frac{4}{\Delta F_{Nt} \cdot \lg e} \cdot (F_N - F_\Omega) \right) \right). \quad (25)$$

Дополненная принципиальная схема изменения классического коэффициента трения в зависимости от нагрузки Б.И. Костецкого приведена мна рис. 4, б (в сравнении с рис. 1, б). Действительно, по данным Б.И. Костецкого [4] $\Delta f_D > 0$, а по данным П.У. Бриджмена [9, 15],

А.С. Ахматова [8], И.К. Александрова [7] и других исследований [5, 6] $\Delta f_D < 0$. Оба эти варианта учитывает новая формула (19), а также частный случай при $\Delta f_D = 0$.

Для случая нескольких фрикционных переходов можно записать [5, 6]:

$$F_f = f_{D0} \cdot F_N + F_{fA0} + \frac{\lg e}{4} \sum_{i=1}^n \left[\Delta f_{Di} \cdot \Delta F_{Nti} \cdot \ln \left(1 + \exp \left(\frac{4}{\Delta F_{Nti} \cdot \lg e} \cdot (F_N - F_{\Omega i}) \right) \right) \right], \quad (26)$$

где n – количество фрикционных переходов. В большинстве случаев $n = 1$, но может быть и большее количество фрикционных

переходов [5, 6].

С учётом (14) формулу (25) можно записать в виде:

$$F_f = (\beta_{d0} + \beta_{a0}) \cdot F_N + F_{fA0} + \frac{(\Delta \beta_d + \Delta \beta_a) \cdot \Delta F_{Nt}}{4 \cdot \ln 10} \cdot \ln \left(1 + \exp \left(\frac{4}{\Delta F_{Nt} \cdot \lg e} \cdot (F_N - F_\Omega) \right) \right). \quad (27)$$

Формулы (16), (25), (26) и (27) выражают обобщённый закон внешнего трения скольжения в границах адгезионно-деформационной теории трения. В настоящее время в науке о трении и изнашивании проблема точной оценки деформационной и адгезионной составляющих

дифференциального коэффициента трения остаётся открытой.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Проведённый анализ законов трения и отклонений от них позволил выявить функцио-

нальные зависимости, описывающие данные отклонения.

2. С использованием интеграла Ферми-Дирака нулевого порядка реализовано обобщение двучленного закона трения на случаи его отклонений от линейности.

3. Введены новые трибологические характеристики, позволяющие более детально описать явление внешнего трения при изменении состояний фрикционного контакта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Леонардо да Винчи.** Избранные произведения. В 2 т. / Репринт с изд. 1935 г. М.: Ладомир, 1995. Т.1. 415 с.
2. **Amontons Guillaume.** De la resistance causée dans les machines, Memoires de l'Academie Royale, Paris, 1699. P. 206–222.
3. **Coulomb C.A.** Théorie des machines simples, Collection des Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris. 10 (1785). P. 163–332.
4. **Костецкий Б.И.** Трение, смазка и износ в машинах [Текст]. Киев: Техніка, 1970. 396 с.
5. **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.
6. **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.
7. **Александров И.К.** Характерная методологическая ошибка при анализе фрикционных сил в паре трения // Механика машин, механизмов и материалов. 2011. № 3 (16). С. 59–63.
8. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения. М.: «Физматгиз», 1963. 472 с.
9. **Бриджмен П.У.** Новейшие работы в области высоких давлений [Текст] / пер. с англ. А. И. Лихтера; под ред. и с доп. Л. Ф. Верещагина. Москва: изд-во и тип. Гос. изд-ва иностр. лит., 1948. 300 с.
10. **Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Стукач А.В.** Математические модели трения скольжения антифрикционных покрытий из полиамида П-54 по стали 45 // Сталь. 2020. № 8. С. 34–38.
11. **Крагельский И.В., Щедров В.С.** Развитие науки о трении. Сухое трение. Издательство Академии Наук СССР Москва, 1956. 236 с.
12. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбатов В.С.** Основы расчетов на трение и износ [Текст]. Москва: Машиностроение, 1977. 526 с.
13. **Кузнецов В.Д.** Физика резания и трения металлов и кристаллов [Текст]: Избр. Труды // В.Д. Кузнецов;

[АН СССР, Сиб. отд-ние, Объедин. учен. совет по физ.-мат. и техн. наукам, Сиб. физ.-техн. ин-т им. В.Д. Кузнецова, Гос. науч.-исслед. ин-т машиноведения им. акад. А.А. Благонравова]. Москва: Наука, 1977. 310 с.

14. **Теория смазочного действия и новые материалы** [Текст]: [Сборник статей] // Акад. наук СССР. Науч. совет по трению и смазкам. Москва: Наука, 1965. 246 с.

15. **Bridgman P.W.** Flow Phenomena in Heavily Stressed Metals / J. Appl. Phys., v. 8. no. 5. 1937. P. 328–336.

16. **Королева О.Н., Мажукин А.В., Мажукин В.И., Бреславский П.В.** Аналитическая аппроксимация интегралов Ферми–Дирака полужелтых и целых порядков // Матем. моделирование. 2016. С. 55–63.

17. **Калиткин Н.Н., Ритус И.В.** Гладкая аппроксимация функций Ферми–Дирака // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1986. Т. 26. № 3, С. 461–465.

18. **ГОСТ Р 55266-2012:** Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование сетей связи. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

19. **Основы автоматического регулирования и управления:** учебн. пособие для неэлектротехн. специальностей вузов / под ред. В.М. Пономарева и А.П. Литвинова М.: Высшая школа, 1974. 439 с.

REFERENCES

1. Leonardo da Vinci. Selected works. In 2 vols. Vol.1./ Reprint from the 1935 edition - Moscow: Lodomir, 1995. - 415 p.
2. Amontons Guillaume. De la resistance causée dans les machines, Memoires de l'Academie Royale, Paris 1699. pp. 206-222.
3. Coulomb C.A. Théorie des machines simples, Collection des Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris, 10 (1785) 163-332.
4. Kostetsky B.I. Friction, lubrication and wear in machines [Text] / B. I. Kostetsky. - Kiev: Technika, 1970. - 396 p.
5. Breki A.D. Tribotechnical characteristics of materials of friction pairs and lubricants in conditions of spontaneous changes in the states of friction contact: dissertation... Doctor of Technical Sciences: 05.02.04 / Alexander Dzhalyulevich Breki; [Place of defense: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. - St. Petersburg, 2021. - 378 p.
6. Breki A.D. Tribotechnical characteristics of materials of friction pairs and lubricants in conditions of spontaneous changes in the states of friction contact: abstract of the dissertation. Doctor of Technical Sciences: 05.02.04 / Alexander Dzhalyulevich Breki; [Place of defense: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. - St. Petersburg, 2021. - 43 p.
7. Alexandrov I.K. A characteristic methodological error in the analysis of frictional forces in a friction pair // Mechanics of machines, mechanisms and materials. 2011. No. 3 (16). pp. 59-63.
8. Akhmatov A.S. Molecular physics of boundary friction. M.: «Fizmatgiz», 1963. - 472 p.
9. Bridgman P.U. The latest works in the field of high pressures [Text] / P.V. Bridgman; Translated from the English by A.I. Lichter; Ed. and with the addition of L.F. Vere-

shchagin. - Moscow: publishing house and type. State Publishing house of foreign lit., 1948. - 300 p.

10. Breki A.D. Mathematical models of sliding friction of antifriction coatings made of polyamide P-54 on steel 45 / Breki A.D., Chulkin S.G., Stukach A.V. and [others] // Steel. 2020. No. 8. pp. 34-38.

11. Kragelsky I.V. Development of the science of friction. Dry friction / I.V. Kragelsky, V.S. Shchedrov. - Publishing House of the USSR Academy of Sciences Moscow, 1956, -236 p.

12. Kragelsky I.V. Fundamentals of calculations for friction and wear [Text] / I.V. Kragelsky, M.N. Dobychin, V.S. Kombalov. - Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 526 p.

13. Kuznetsov V.D. Physics of cutting and friction of metals and crystals [Text]: Selected works / V.D. Kuznetsov; [USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, United. learned. advice on phys.-mat. and technical sciences, Sib. phys.-tech. V.D. Kuznetsov Institute, State Scientific Research Institute. in-t of machine science named after. akad. A.A. Blagonravova]. - Moscow: Nauka, 1977. - 310 p.

14. Theory of lubricating action and new materials [Text]: [Collection of articles] / Academy of Sciences

of the USSR. Sci. advice on friction and lubricants. - Moscow: Nauka, 1965. - 246 p.

15. Bridgman, P.W., Flow Phenomena in Heavily Stressed Metals, J. Appl. Phys., v.8, no. 5, 1937, pp. 328–336.

16. Koroleva O.N., Mazhukin A.V., Mazhukin V.I., Breslavsky P.V. Analytical approximation of Fermi–Dirac integrals of half-integers and integer orders. modeling, 28:11 (2016), pp. 55-63.

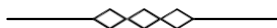
17. Kalitkin N.N., Ritus I.V. Smooth approximation of Fermi–Dirac functions // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1986, volume 26, number 3, pp. 461-465.

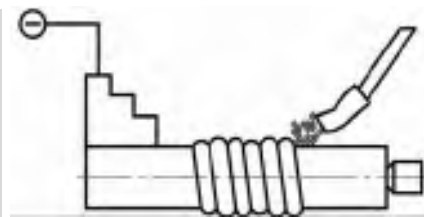
18. GOST R 55266-2012: Electromagnetic compatibility of technical means. Communication network equipment. Requirements and test methods. M.: Standartinform, 2013. – 36 p.

19. Fundamentals of automatic regulation and control / Ed. Ponomareva V. M. and Litvinova A. P. Educational. manual for non-electrical engineering. Specialties of universities. – M.: Higher School, 1974. – 439 p.

Статья поступила в редакцию 01.12.2022; одобрена после рецензирования 14.12.2022; принята к публикации 23.12.2022.

The article was submitted 01.12.2022; approved after reviewing 14.12.2022; assepted for publication 23.12.2023.





Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. №2 (140). С. 40-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №2 (140). P. 40-48.

Научная статья
УДК 621.7
doi:10.30987/2223-4608-2023-2-40-48

Технологические методы продления долговечности цилиндрических поверхностей трения

Александр Олегович Горленко¹, Д.Т.Н.,
Алмосшо Набот Шохиён², К.Т.Н.,
Андрей Николаевич Щербаков³, К.Т.Н.

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

² Институт технологий и инновационного менеджмента в городе Куляб, Таджикистан

¹ buqi12bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

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

³ taiga78@list.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрены технологические методы восстановления изношенных цилиндрических поверхностей трения, применимые как в сфере производства деталей для устранения брака, так и при ремонте машин для восстановления изношенных поверхностей трения.

Ключевые слова: восстановление, выдавливание, наварка, электромеханическая обработка, износ

Для цитирования: Горленко А.О., Шохиён А.Н., Щербаков А.Н. Технологические методы продления долговечности цилиндрических поверхностей трения // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2023. – № 2 (140). – С. 40-48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-40-48.

Original article

Technological methods for durability extending of cylindrical friction surfaces

Alexander O. Gorlenko¹, Dr.Sc.Tech.,
Almosho N. Shohnyon², Cand. Sc. Tech.,
Andrey N. Shcherbakov³, Cand. Sc. Tech.

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

² Institute of Technology and Innovation Management in Kulyab, Tajikistan

¹ buqi12bk.ru, ² a_shoev@mail.ru, ³ taiga78@list.ru

Abstract. Technological methods of worn cylindrical friction surfaces restoration, applicable both in parts production for the elimination of defects, and in machine maintenance for worn friction surfaces restoration, are viewed.

Keywords: restoration, extrusion molding, welding, electromechanical processing, wear

For citation: Gorlenko A.O., Shohnyon A.N., Shcherbakov A.N. Technological methods for durability extending of cylindrical friction surfaces. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 40-48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-40-48.

Долговечность цилиндрических поверхностей трения деталей в значительной мере определяется их износостойкостью. Износ цилиндрических сопряженных поверхностей приводит к увеличению зазора, а, следовательно, к потере точности, появлению дополнительных нагрузок, вибраций и зачастую к разрушению деталей. Поэтому, как правило, максимально допустимый зазор в цилиндрических соединениях оговаривается в технических условиях.

При достижении предельно допустимого износа (зазора в сопряжении) встает вопрос о необходимости либо замены данной пары трения, либо восстановления прежних размеров изношенных поверхностей деталей. Совершенно очевидно, что в большинстве случаев продление долговечности цилиндрических поверхностей трения за счет восстановления их размера будет экономически целесообразно. При ремонте для восстановления размеров изношенных поверхностей деталей машин применяют разнообразные технологические методы. Выбор приемлемого метода определяется величиной восстанавливаемого поверхностного слоя [1, 2].

Восстановление рабочих поверхностей трения деталей включает в себя три процесса: подготовка детали под восстановление; восстановление; обработка восстановленных поверхностей деталей.

Пластическое деформирование материала применяют для восстановления формы и размеров поверхностей трения за счет перемещения материала в объеме самой детали. Этот способ используют для восстановления деталей, изготовленных из пластичных материалов (стали, меди, бронзы и др.), а также для обработки хрупких материалов, которые превращаются в пластичные путем нагрева или создания благоприятных условий нагружения. Основная особенность данного способа состоит в том, что при восстановлении большого количества параметров деталей обходятся без применения дополнительного материала.

Пластическая деформация кристаллических тел проявляется в результате смещения атомных слоев по плоскостям скольжения под действием внешних сил. Чем больше плоскостей сдвига образуется в объеме материала, тем более он пластичен, тем при меньших напряжениях деформируется заготовка.

Степень и усилие деформирования мате-

риала зависят от его химического состава и структуры, температуры нагрева, скорости деформирования и схемы главных напряжений.

Наибольшую пластичность имеют чистые металлы. Введение в состав металла легирующих элементов чаще всего уменьшает его способность к пластическому деформированию. Неоднородность структуры и неравномерность распределения примесей также приводят к уменьшению пластичности. Величина зерна влияет на пластичность при холодном деформировании. Чем меньше размер зерна, тем прочнее металл и ниже его пластичность. При горячем деформировании размер зерна не сказывается на пластичности.

Пластичность материала увеличивается при его нагреве. Различают холодное и горячее деформирование в зависимости от соотношения температур процесса и рекристаллизации. При холодном деформировании температура обработки меньше температуры рекристаллизации, а при горячем – наоборот.

Нагрев до температурыковки в 10 – 15 раз уменьшает сопротивление деформированию по сравнению с процессом в холодном состоянии. Нагрев деталей из углеродистых сталей до 350 °С не увеличивает, а снижает пластичность, а нагрев более 700 °С приводит к появлению окалины. Поэтому нагрев таких сталей целесообразен в указанном интервале температур.

При восстановлении деталей машин пластическим вытеснением материала основным технологическим режимом является усилие выдавливания. При расчете данных усилий учитывается то, что пластическая деформация наступает тогда, когда напряжения сдвига в материале детали превышают предел его упругости. В то же время, наряду с пластической деформацией присутствует и упругая деформация, в результате действия которой размеры детали в конечный момент нагружения отличаются от размеров после снятия нагрузки.

Восстановление размеров элементов деталей пластическим вытеснением за счет перемещения материала включает подготовку детали, нагрев (при необходимости), приложение деформирующего усилия и последующую обработку.

Подготовка детали к деформированию представляет собой отжиг или высокотемпературный отпуск. В некоторых случаях заготовку непосредственно перед деформированием на-

гревают до температурыковки.

Процессы перемещения материала при пластическом деформировании классифицируют в зависимости от соотношения направления внешних сил и деформаций: осадка, раздача, обжатие, вытяжка и вдавливание (рис. 1).

Осадка (см. рис. 1, а) применяется для увеличения наружного размера сплошных деталей.

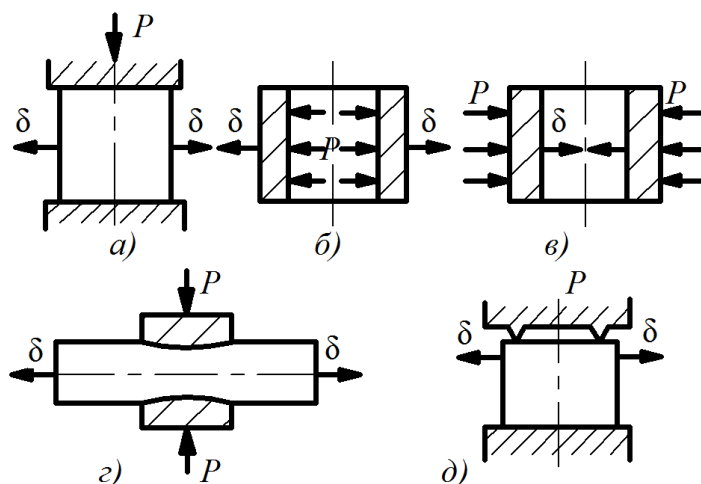


Рис. 1. Способы восстановления размеров деталей:

а – осадка; б – раздача; в – обжатие; г – вытяжка; д – вдавливание

Направления действующих сил и деформаций при раздаче (см. рис. 1, б) совпадают и направлены изнутри детали. Раздачу применяют для восстановления по наружному диаметру поршневых пальцев, чашек дифференциала, втулок и других деталей с нежесткими требованиями к внутренним размерам.

При обжатии (см. рис. 1, в) направления действующих сил и деформаций совпадают, но направлены внутрь детали. Этот способ применяют при восстановлении внутренней поверхности детали с нежесткими требованиями к наружным размерам.

Вытяжку (см. рис. 1, г) применяют для увеличения длины детали за счет уменьшения ее поперечного сечения. Вытяжкой восстанавливают, например, размеры толкателей при износе торцовых поверхностей.

Вдавливание (см. рис. 1, д) объединяет в себе признаки осадки и раздачи. Одновременное протекание осадки и раздачи сохраняет длину детали, что является преимуществом способа. Вдавливание применяют при восстановлении зубьев шестерен, шлицев и других поверхностей деталей. Как правило, процесс ведут при высокой температуре нагрева (до 680...920 °С). Частным случаем вдавливания

При осадке действие силы P перпендикулярно к направлению деформации δ . В результате воздействия площадь поперечного сечения детали увеличивается вследствие уменьшения ее высоты. Способ применяют для восстановления диаметров пальцев, коротких осей при нежестких требованиях к их длине.

является накатка (рис. 2).

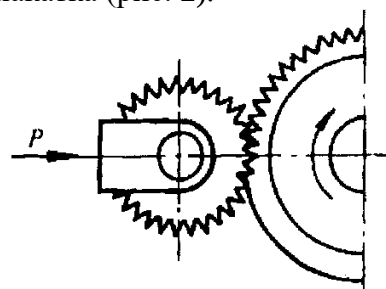


Рис. 2. Накатка поверхности

Ее применяют для увеличения наружного или уменьшения внутреннего размера деталей за счет вытеснения металла из отдельных участков рабочих поверхностей. Накатку применяют для восстановления размеров шеек и отверстий под подшипники, а также подшипников, залитых свинцовистой бронзой. Образовавшиеся лунки заливают баббитом для восстановления несущей способности антифрикционного слоя. Поверхности накатывают специальным инструментом – зубчатым роликом с прямыми или косыми зубьями.

Наиболее перспективным восстановлением соединений, величина износа которых составляет 0,004...0,02 мм, представляется увеличение наружного диаметра за счет высоты наплывов,

образующихся по краям микроканалов при формировании рельефа поверхностей пластическим деформированием. При этом удается решить одновременно две задачи: восстановить размер и придать обработанной поверхности положительные антифрикционные свойства (наличие маслосъемных каналов предотвращает в эксплуатации сухое трение и связанные с ним задиры контактирующих поверхностей, их заклинивание).

Одним из методов восстановления такой малой величины износа поверхностей деталей машин пластическим деформированием является алмазное выдавливание. При восстановлении алмазным выдавливанием в качестве инструмента применяются, как правило, выглаживатели из синтетического алмаза марки АСПК (Нормаль ВНИИАЛМАЗа ОН 037-103-67). Инструмент применяется с рабочей частью конуса, имеющей радиус сферы такой же, как и для алмазного выглаживания. В отличие от выглаживания, которое проводится для упрочнения поверхностного слоя и уменьшения высотных параметров шероховатости, при выдавливании величина подачи составляет 0,3...1,5 мм/об. В зависимости от условий эксплуатации восстанавливаемых поверхностей деталей машин величина подачи инструмента может устанавливаться непрерывно, и на поверхности будет образовываться винтовая линия, либо восстановление производится образованием на поверхности деталей замкнутых кольцевых канавок.

Алмазное выдавливание, например, можно применять для восстановления изношенных поверхностей прецизионных направляющих скольжения (восстановление с образованием винтовой канавки) или деталей плунжерных пар (восстановление с образованием кольцевых канавок) и др.

При проведении экспериментов по восстановлению алмазным выдавливанием наружных цилиндрических поверхностей трения в качестве инструмента применялся выглаживатель из синтетического алмаза марки АСПК-3. В результате обработки данных, после определения коэффициентов уравнения, проверки на адекватность уравнения, имеем следующую зависимость величины восстановленного размера от условий обработки:

$$\Delta d = \frac{2,46 \cdot 10^{-3} \cdot P^{0,388}}{r^{1,063} \cdot s^{0,169}}, \quad (1)$$

где Δd – величина восстановленного размера, мм; P – усилие выдавливания, Н; r – радиус инструмента, мм; s – подача инструмента, мм/об.

Инструментальная оснастка для проведения экспериментов по алмазному выдавливанию представлена на рис. 3.

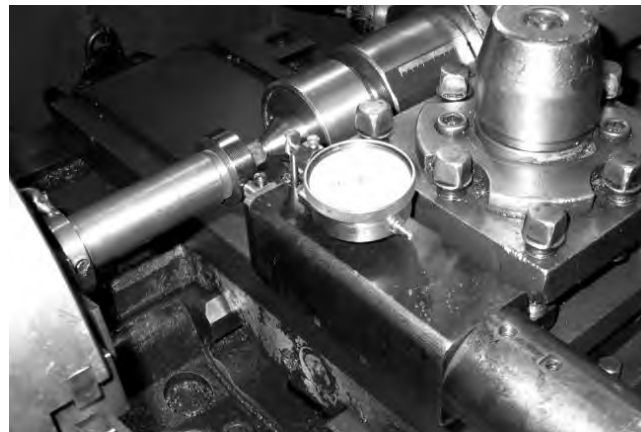


Рис. 3. Оснастка для проведения экспериментов по алмазному выдавливанию

Учитывая, что алмазное выдавливание не является окончательной размерной обработкой для получения требуемого размера, после операции восстановления образцы подвергались отделочной обработке. В качестве окончательной отделочной обработки был предложен метод доводки. По рекомендациям справочных данных был выбран материал притира серый чугун СЧ-15. Форма притира для данных образцов – разрезное кольцо. Абразивный материал – алмазная паста АСМ зернистостью 20/14. Обработка осуществлялась на токарном станке вручную. Величина снимаемого припуска составляла 0,002...0,01 мм.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что алмазное выдавливание с последующей доводкой позволяет эффективно восстанавливать размер цилиндрических деталей на 0,004...0,02 мм. Причем наибольшее влияние на величину восстановленного размера оказывает радиус инструмента и усилие выдавливания, менее значимо влияние величины продольной подачи инструмента.

Еще одним технологическим методом восстановления рабочих поверхностей трения является электрохимическая обработка (ЭМО) [1 – 3].

Высадка металла при восстановлении ЭМО осуществляется за счет внедрения инструмента, который представляет собой слегка притупленный клин с подводом к инструменту

и детали электрического тока для увеличения выдавливаемого материала и одновременного процесса закалки при подаче охлаждения в зону обработки. Схема процесса представлена на рис. 4.

Очевидно, что для достижения максимальной величины высадки, а, следовательно, и для достижения минимального предела текучести восстанавливаемого материала, необходимо подводить к месту контакта инструмента максимальную силу тока. Однако выбор силы тока ограничивается его прочностью и стойкостью. Для материала выбора инструмента, был проведен ряд экспериментов и определены значения максимальной силы тока, исходя из его стойкости, и минимальное значение, при котором начинало заметно сказываться его влияние, а также, исходя из технологических возможностей установки.

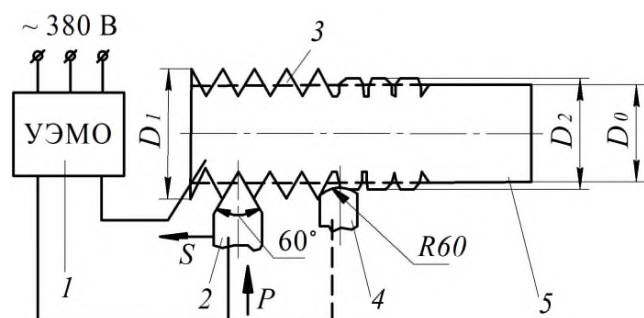


Рис. 4. Схема процесса восстановления размера детали при ЭМО:

1 – установка для электрохимической обработки; 2 – выдавливающий ролик; 3 – выдавленный профиль; 4 – сглаживающий ролик; 5 – деталь; D_0 – диаметр после сглаживания; D_1 – диаметр после высадки; D_2 – диаметр до высадки

Как показали многие исследования, с увеличением угла заточки инструмента величина выдавливания уменьшается. Объясняется это тем, что с увеличением угла заточки уменьшается радиальная составляющая давления. Однако его уменьшение на угол, меньший 45° , приводит к существенному снижению стойкости инструмента, сопровождающемуся его хрупким разрушением.

Т. к. инструмент для восстановления изношенных деталей электрохимической обработкой (выдавливанием, наваркой) работает в жестких условиях (высокие температурные и силовые нагрузки), а также при этом способе восстановления необходима высокая электрическая проводимость материала инструмента и достаточная износостойкость контактной по-

верхности, то наиболее целесообразным является применение в качестве материалов инструмента термостойких бронз типа БрХ 0,7; жаропрочных сталей типа 95Х18; тугоплавких металлов с насыщением объема материалами на основе меди (псевдосплавы).

В качестве инструмента для электрохимической обработки могут применяться как пластины, работающие в условиях трения скольжения, так и ролики, работающие в условиях трения качения. Однако, как показали исследования, стойкость выдавливающего инструмента может быть повышена за счет применения вращающегося инструмента (ролика) и его обильного охлаждения.

Из анализа стойкостных зависимостей инструмента по литературным данным и на основе собственных экспериментальных исследований, проведенных на инструменте из быстрорежущей стали Р6М5, жаропрочной стали 95Х18, твердого сплава ВК8 принята рациональная геометрия заточки инструмента: угол заточки $50...60^\circ$; радиус высаживающей кромки $0,1...0,2$ мм.

Инструмент и оснастка для электрохимического выдавливания приведены на рис. 5 и рис. 6.

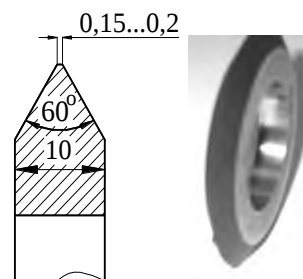


Рис. 5. Инструмент для электрохимического выдавливания из стали 95Х18

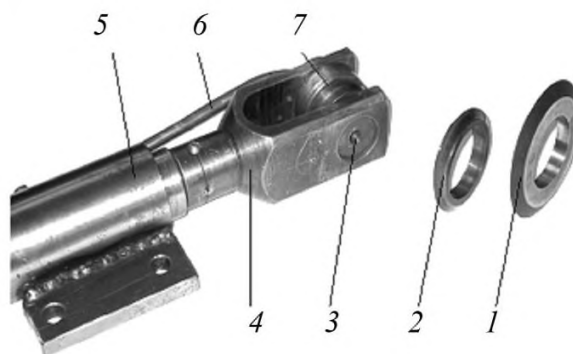


Рис. 6. Инструментальная оснастка при восстановлении электрохимической обработкой:

1 – ролик для выдавливания ЭМО; 2 – ролик для наварки и упрочнения ЭМО; 3 – ось роликов; 4 – вилка; 5 – пружинная державка; 6 – трубка для подвода охлаждения; 7 – оправка для роликов

В результате проведения экспериментов и обработки их результатов была получена эмпирическая зависимость величины восстановленного размера от условий обработки, которая имеет следующий вид:

$$\Delta d = \frac{4,873 \cdot 10^{-5} \cdot I^{0.602} \cdot P^{0.485} \cdot i^{0.572}}{s^{0.571}}, \quad (2)$$

где Δd – величина восстановленного размера, мм; P – сила выдавливания, Н; I – величина силы тока, А; i – число рабочих ходов; s – подача инструмента, мм/об.

В качестве окончательной отделочной обработки, после операции восстановления была выбрана доводка чугуной колодкой с нанесением алмазной пасты. Величина снимаемого припуска составляла 0,01...0,03 мм.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что электромеханическое выдавливание с последующей доводкой позволяет эффективно восстанавливать размер наружных цилиндрических поверхностей на 0,02...0,1 мм.

При необходимости восстановления больших величин износа применяют добавочные материалы, наносимые на восстанавливаемые поверхности различными способами.

Так, например, при восстановлении размеров деталей на величину до 0,2...0,4 мм в качестве добавочного материала используют различные порошки. Порошок наносят на восстанавливаемую поверхность несколькими способами: обмазкой, свободным просыпанием в зону контакта инструмента и заготовки, удержанием порошка в зоне контакта с помощью электромагнитного поля.

На базе предварительных исследований, был проведен ряд экспериментов по выбору связующего компонента для обмазки. Эксперименты проводились с использованием этил-силиката (жидкое стекло), цапон лака, графитной смазки. Дополнительный материал (порошок) перемешивался со связующим компонентом в соотношении 1:1, и наносился равномерным слоем на восстанавливаемую поверхность. В результате проведенные эксперименты позволили выбрать в качестве связующего компонента, при нанесении порошка на поверхность обмазкой, графитную смазку, как пластичный, электропроводный материал, дающий удовлетворительные результаты по качеству наваренного слоя.

Для получения более равномерного слоя рекомендуется наносить тонкий слой связующего компонента на восстанавливаемую поверхность, а потом наносить дополнительный материал путем его свободного просыпания на обмазанную поверхность.

В качестве рабочего инструмента при проведении данных экспериментов применялись ролики из бронзы марки БРХ 0,7 и псевдосплава карбида вольфрама с медью. После наварки трех слоев производилось упрочнение восстановленного слоя путем прохождения инструментом на тех же режимах с подачей СОТС поливом в зону обработки.

В результате обработки данных, после определения коэффициентов уравнений и проверки их на адекватность были получены следующие зависимости величины восстановленного размера Δd (мм) от условий обработки: при наварке бронзовым роликом с обмазкой:

$$\Delta d = \frac{419,95 \cdot v^{0.244}}{P^{0.158} \cdot I^{0.753}}, \quad (3)$$

и при наварке псевдосплавным роликом с обмазкой:

$$\Delta d = \frac{3626,6 \cdot v^{0.125}}{P^{0.485} \cdot I^{0.758}}. \quad (4)$$

Т. о., результаты проведенных исследований показали, что электромеханическая наварка дополнительного материала (порошка), наносимого обмазкой, бронзовым и псевдосплавным роликами позволяет эффективно восстанавливать размер наружных цилиндрических поверхностей (с последующей отделочной обработкой алмазным точением или шлифованием) на 0,1...0,3 мм. При данном способе восстановления основное влияние на величину восстановленного размера оказывает величина силы тока. Данный фактор будет сказываться на качестве сцепления частиц порошка между собой и с основным материалом, а также на величине пористости покрытия.

При нанесении дополнительного материала (порошка) на восстанавливаемую поверхность обмазкой, получается покрытие с очень большой пористостью. Это вызвано наличием так называемого «третьего тела» – графитной смазки, которая при наварке из-за высоких температур выгорает в зоне контакта инструмента и слоя дополнительного материала.

Для улучшения качества восстановленного слоя (уменьшения его пористости и лучшего припекания к поверхности), предлагается изба-

виться от «третьего тела» путем нанесения порошка свободным просыпанием из бункера. Однако при таком способе нанесения дополнительного материала происходит очень большой его перерасход. Поэтому, для избегания данного недостатка, предлагается использовать элек-

тромагнитное поле для удержания порошка в зоне наварки.

Для проведения экспериментов с таким способом нанесения дополнительного материала было разработано и изготовлено специальное приспособление, представленное на рис. 7.

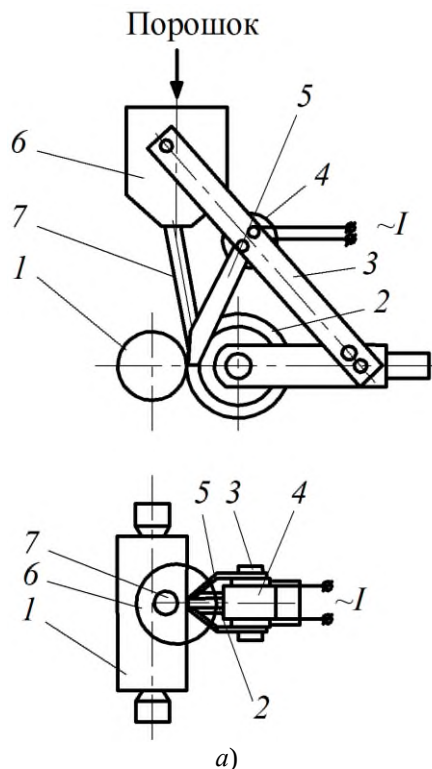


Рис. 7. Приспособление для подачи и удержания порошка в зоне наплавки:

а – схема приспособления: 1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – направляющие; 4 – электромагнит; 5 – удлинительные планки; 6 – бункер; 7 – сопло;
б – общий вид приспособления

После наварки восстановленный слой упрочнялся путем прохождения инструментом с теми же режимами и поливом СОТС в зону обработки.

После определения коэффициентов уравнения, проверки на адекватность, имеем следующую зависимость величины восстановленного размера от условий обработки:

$$\Delta d = \frac{35,555 \cdot s^{0.594}}{p^{0.208} \cdot I^{0.351}} \quad (5)$$

После операции восстановления поверхности деталей подвергаются отделочной обработке для получения требуемого размера. Для поверхностей, восстановленных электрохимической обработкой с дополнительным металлом, в качестве отделочной обработки рекомендуются алмазное точение, получистовое и чистовое шлифование. Величина снимаемого припуска составляет 0,1...0,3 мм.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что электрохимическая наварка дополнительного материала (порошка) с использованием электромагнитного поля позволяет эффективно восстанавливать размер наружных цилиндрических поверхностей с последующим шлифованием на 0,2...0,4 мм.

После восстановления изношенных поверхностей трения естественно возникает вопрос, как они будут себя вести в парах трения. Для этого исследованию были подвергнуты как исходные образцы термообработанные и нетермообработанные, так и восстановленные по предложенным технологиям.

Результаты измерений коэффициентов трения в процессе изнашивания образцов представлены на рис. 8.

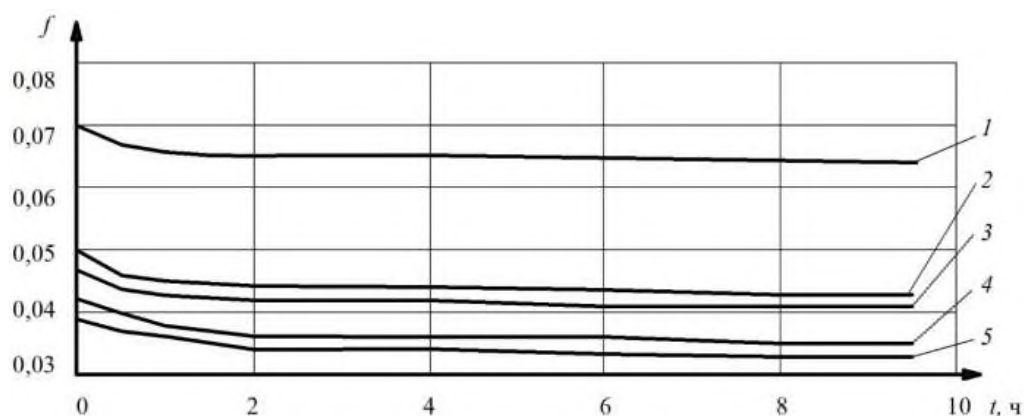


Рис. 8. Коэффициент трения скольжения при различных методах восстановления:

1 – образец нетермообработанный; 2 – образец, восстановленный электромеханическим выдавливанием; 3 – образец, восстановленный алмазным выдавливанием; 4 – образец после объемной закалки; 5 – образец, восстановленный наваркой ЭМО с электромагнитным полем

Их анализ показывает, что примерно через два часа после начала испытаний заканчивается процесс приработки на уровне микрогеометрии поверхностного слоя, т.е. сформировываются параметры равновесной шероховатости поверхности. Как видно из графиков, коэффициент трения с образцом, восстановленным наваркой ЭМО с подачей порошка в электромагнитном поле несколько меньше, чем у образца

после объемной закалки. Это объясняется пористостью наваренного слоя. Данные поры на рабочей поверхности трения образца выступают в роли масляных карманов, в которых удерживается смазочный материал и продукты износа.

Графики износа образцов приведены на рис. 9.

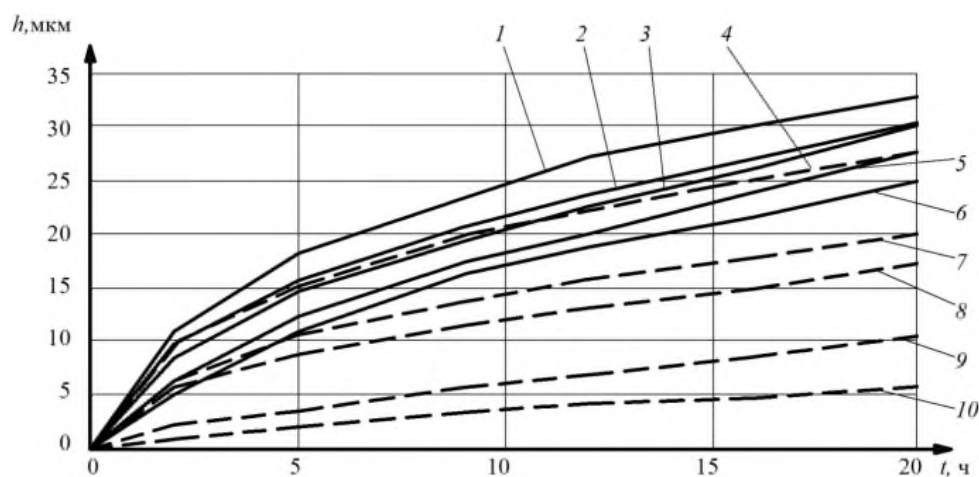


Рис. 9. Графики зависимости износа от времени:

1 – суммарный износ с нетермообработанными образцами; 2 – суммарный износ с образцом, восстановленным выдавливанием ЭМО; 3 – суммарный износ с образцом, восстановленным алмазным выдавливанием; 4 – износ образцов нетермообработанных; 5 – суммарный износ с образцом, восстановленным наваркой ЭМО с электромагнитным полем; 6 – суммарный износ с образцом после объемной закалки; 7 – износ образцов, восстановленных выдавливанием ЭМО; 8 – износ образцов, восстановленных алмазным выдавливанием; 9 – износ образцов, восстановленных наваркой ЭМО с электромагнитным полем; 10 – износ образцов после объемной закалки

Обработка полученных результатов позволила определить величину износа образцов в период приработки и интенсивность изнашива-

ния образцов в период нормального изнашивания (табл. 1).

1. Результаты экспериментов на изнашивание

Метод обработки	Величина износа h в период приработки $L = 1269$ м, мкм	Интенсивность изнашивания I (средние значения) в период нормального изнашивания	Класс износостойкости
Образцы нетермообработанные	15,2	$3,289 \cdot 10^{-9}$	VIII
Образцы, восстановленные выдавливанием ЭМО	10,5	$2,428 \cdot 10^{-9}$	
Образцы, восстановленные алмазным выдавливанием	8,8	$2,193 \cdot 10^{-9}$	
Образцы, восстановленные наваркой ЭМО с электромагнитным полем	3,4	$1,775 \cdot 10^{-9}$	
Образцы после объемной закалки	1,8	$1,07 \cdot 10^{-9}$	

Анализ полученных результатов сравнительных испытаний показывает, что предложенные технологии восстановления позволяют обеспечить износостойкость восстановленной детали, практически равную износостойкости новой детали.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
2. Суслов А.Г., Говоров И.В., Щербakov А.Н. Экономичная система технологического обеспечения долговечности поверхностей трения изделия // Тяжелое машиностроение. 2004. №5. С. 16–18.

3. Щербakov А.Н. Электромеханическое восстановление наружных поверхностей вращения // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. 2004. №4. С. 63–64.

REFERENCES

1. Engineering of the surface of parts / ed. A.G. Suslova. - M.: Mashinostroenie, 2008. - 320 p.
2. Suslov A.G., Govorov I.V., Shcherbakov A.N. Economic system of technological support for the durability of friction surfaces of a product // Heavy Machine Building. - 2004. No. 5. - P. 16–18.
3. Shcherbakov A.N. Electromechanical restoration of external surfaces of rotation // Handbook. Engineering Journal. Appendix. - 2004. - No. 4. - P. 63–64.

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 26.12.2022; одобрена после рецензирования 26.12.2022; принята к публикации 17.01.2023.

The article was submitted 26.12.2022; approved after reviewing 26.12.2022; assepted for publication 17.01.2023.

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 С.В. Морозов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор С.В. Морозов.

Сдано в набор 17.02.2023. Выход в свет 28.02.2023.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

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

