

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 6 (144)

2023

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

д.т.н., доцент ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

д.т.н., чл.-корр. РАН ПРИХОДЬКО В.М.
(г. Москва)

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г. (г. Москва)

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БУЯНОВСКИЙ И.А. (г. Москва)

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

д.т.н., проф. ГУСЕЙНОВ Г.А. (г. Баку,
Азербайджан)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. КАВАЛЕК А.А. (г. Ченстохова,
Польша)

д.н., магистр наук КРЕХЕЛЬ Р. (г. Капушан,
Словакия)

д.т.н., проф. КУКСЁНОВА Л.И. (г. Москва)

д.т.н., доц. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

д.т.н., акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк)

д.т.н., проф., акад. НАН Беларуси

МЫШКИН Н.К., (г. Гомель, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

к.т.н., доц. ШОХИЁН А.Н. (г. Куляб, Таджикистан)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить по интернет-
каталогу "Пресса по подписке".

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
26 апреля 2019 года
рег. номер ПИ № ФС77-75524

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Богомолов М.Н., Ямников А.С., Ямникова О.А. Осевая сила при
резании сферической фрезой 3

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Макаров В.Ф., Песин М.В., Волков М.В. Повышение эффективности
прорезки глубоких елочных пазов в дисках газовых турбин из
жаропрочных сплавов путем применения комбинированного
метода гидроабразивной обработки и протягивания 9

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

Тихомиров В.П., Шалыгин М.Г., Измеров М.А. Модель контакта и
оценка молекулярной составляющей силы трения 20

Иванов С.В., Антошин В.А., Мельников Д.А., Албагачиев А.Ю.
Абразивная износостойкость и ресурс эксплуатации труб из
стеклокомпозита 28

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Злобин Е.П., Хаймович А.И., Гончаров Е.С. Балякин А.В. Влияние
технологических параметров вибрационной обработки на качество
изделий, зготовленных по технологии селективного лазерного
сплавления 38

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

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 6 (144)

2023

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s., prof. SUSLOV A.G. (Moscow)

Deputy chief editor

d.en.s., assoc. prof. SHALYGIN M.G. (Bryansk)

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIKHODKO V.M. (Moscow)

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGORYANTS A.G. (Moscow)

Editorial Committee:

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BUYANOVSKII I.A. (Moscow)

PhD., Dr. Engineer WALDENMAIER T.
(Stuttgart, Germany)

d.en.s., prof. HUSEYNOV H.A. (Baku,
Azerbaijan)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. KAWALEK A.A. (Czestochowa,
Poland)

PhD., Msc. KREHEL R. (Kapusany, Slovakia)

d.en.s., prof. KUKSENOVA L.I. (Moscow)

d.en.s., assoc. prof. LARIN S.N. (Tula)

d.en.s., Acad. RASLYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm)

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIKHAILOV A.N. (Donetsk)

d.en.s., prof. MYSHKIN N.K. Acad. of NAS
Belarus (Gomel, Belarus)

d.en.s., prof. OVCHINNIKOV V.V. (Moscow)

d.en.s., prof. PETROVA L.G. (Moscow)

d.en.s., prof. SMOLENTSEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. FEDONIN O.N. (Bryansk)

d.en.s., prof. KHEIFETZ M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. TCHIGIR INSKY Ju.L. (Volgograd)

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Subscription index: **379195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

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

CONTENTS

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Bogomolov M.N., Yamnikov A.S., Yamnokova O.A. Thrust force in cut
using spherical head cutter 3

TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Makarov V.F., Peskov M.V., Volkov M.V. Increasing the efficiency of slotting
deep fir trees in gas turbine discs made of heat-resistant alloys by applying a
combined method of hydroabrasive treatment and broaching 9

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

Tikhomirov V.P., Shalygin M.G., Izmerov M.A. Contact model and evaluation of
friction force molecular component. 20

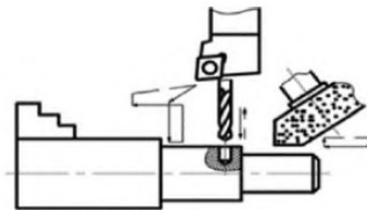
Ivanov S.V., Antoshin V.A., Melnikov D.A., Albagachiev A.Yu. Abrasive wear
resistance and service life of pipes made of fiber-glass composite 28

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

Zlobin E.P., Khaimovich A.I., Goncharov E.S., Balakin A.V. The effect of
vibration treatment technological parameters on the quality of products,
manufactured by using selective laser fusion technology 38

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №6 (144). С.3-8.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №6 (144). P. 3-8.

Научная статья
УДК 621.941.1
doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-8

Осевая сила при резании сферической фрезой

Максим Николаевич Богомолов¹, аспирант
Александр Сергеевич Ямников², д.т.н.
Ольга Александровна Ямникова³, д.т.н.

^{1,2}Тульский государственный университет, Тула, Россия

³АО НПО СПЛАВ им. А.Н. Ганичева, Тула, Россия

¹bogomolovmn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5842-3493>.

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

³yamnikovaoa@mail.ru

Аннотация. Отмечены достижения науки о резании материалов в России и за рубежом. Специфика резания сферической фрезой отличается наличием вблизи оси толщин срезаемых слоев материала заготовки и скорости резания, стремящихся к нулю. Предложена схема, позволяющая рассчитать величину осевой силы резания как интеграл по углу наклона режущей кромки относительно оси фрезы от точки начала срезаемого слоя до его конца. Вычисление переменной части определенного интеграла, без учета постоянной силы резания, произвели с помощью математического пакета Mathcad.

Для определения соотношения нормальной составляющей силы резания к главной были проанализированы результаты работы, в которой был поставлен специальный контрольный эксперимент по определению указанных составляющих силы резания при изменении толщины срезаемого слоя то нуля до начала процесса стабильного стружкоотделения. Установлено, что в момент начала процесса стружкоотделения главная составляющая силы резания резко (в 2,5 раза) возрастает, а нормальная – скачков не имеет.

Ключевые слова: процесс резания, режимы и составляющие силы резания, сферическая фреза, осевая сила, малые толщины срезаемых слоев, кривизна режущей кромки, определенный интеграл

Для цитирования: Богомолов М.Н., Ямников А.С., Ямникова О.А. Осевая сила при резании сферической фрезой // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-8

Thrust force incut using spherical head cutter

Maxim N. Bogomolov¹, PhD student

Alexander S. Yamnikov², D.Eng.

Olga A. Yamnikova³, D.Eng.

^{1,2}Tula State University, Tula, Russia

³JSC NPO SPLAV named after A.N. Ganichev, Tula, Russia

¹bogomolovmn@mail.ru

²yamnikovas@mail.ru

³yamnikovaoa@mail.ru

Abstract. Achievements of cutting materials science in Russia and abroad have been emphasized. Tooling operation specifics using a spherical milling cutter is characterized by slice thick-ness of work material burst layers located in close

proximity of the axis and the cutting speed, which tends to zero. A scheme that allows calculating the value of the axial cutting force as an integral of the cutter bit angularity relative to the axis of the cutter from the point of origin of the burst layer to its end, is proposed. The calculation of the variable part of a certain integral, without taking into account the constant cutting force, was performed using the Mathcad mathematical package.

To determine the ratio of the cutting force normal component to the main characteristic, the results of the work, where a special control experiment was carried out to determine the specified components of the cutting force when the burst layer thickness was changed from zero to the beginning of the stable chip separation process, were analyzed. It is found that at the beginning of the chip separation process, the main component of the cutting force rises exponentially (by 2,5 times), and the normal one does not spike.

Keywords: cutting process, modes and components of cutting forces, spherical milling cutter, axial force, shallow thickness of burst layers, cutter bit angularity, a definite integral

For citation: Bogomolov M.N., Yamnikov A.S., Yamnikova O.A. Thrust force in-cut using spherical head cutter / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №6 (144). P. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-8

Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Процесс резания материалов достаточно хорошо изучен как в России, так и за рубежом [1 – 8]. Специалистов по резанию обычно интересуют режимы резания и стойкость инструмента, а также влияние процесса резания на качество обработанной поверхности. При расчетах режимов резания обычно ограничиваются определением главной (окружной) составляющей силы резания [1 – 4]. Для технологов важно знать значение нормальной составляющей силы резания, например для расчета деформаций технологической системы [9]. Эту составляющую для различных процессов резания определяют в долях от главной (окружной): $P_N = (0,4 \div 0,5) P_z$. При фрезеровании цилиндрической фрезой толщина срезаемого слоя переменная и зависит от угла контакта зуба фрезы θ с заготовкой (рис. 1).

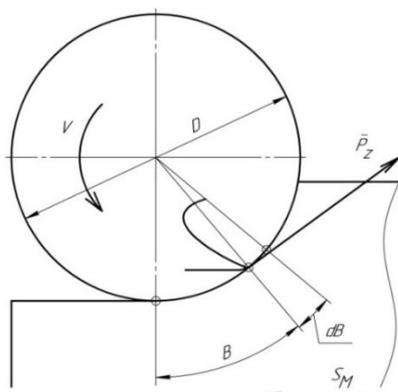


Рис. 1. Схема для определения главной (окружной) составляющей силы резания при фрезеровании цилиндрической фрезой

Главную (окружную) составляющую силы резания при фрезеровании

цилиндрической фрезой определяют как $P_z = C_{pz} s^y B (\sin \theta)^y$, где B – ширина фрезы [Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение. 1975. 344 с.]. Для составляющей силы резания, нормальной к обрабатываемой поверхности предлагается зависимость: $P_N = (0,4 \div 0,6) P_z$.

В настоящее время для обработки фасонных поверхностей на станках с ЧПУ широко применяются сферические фрезы, позволяющие путем программирования траектории получать произвольные формы, не зависящие от профиля фрезы, что исключает необходимость проектирования и изготовления сложных фасонных фрез.

Для определения величины упругих деформаций технологической системы и, в частности, деформаций тонкой стенки обрабатываемой втулки, необходимо знать величину осевой составляющей силы резания. Аналитический обзор литературы [1 – 4] показал, что зависимости для определения наибольшего значения осевой (для сферической фрезы) силы резания нет. Имеются только зависимости для определения главной (окружной) составляющей силы резания [1 – 4, 6]. В работе [9] анализируются силы резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами, но при этом исключается резание в области оси фрезы.

Постановка задачи

Специфика резания сферической фрезой отличается наличием вблизи оси толщин срезаемых слоев материала заготовки и скорости резания, стремящихся к нулю. Схема

расчета параметров срезаемого слоя, возникающих при резании сил, представлена на рис. 2. Как видно из рисунка текущее направление нормальной к режущей кромке составляющей

силы резания dP_N является переменным и зависящим от углового положения текущей точки режущей кромки $dP_N = f(\varphi)$.

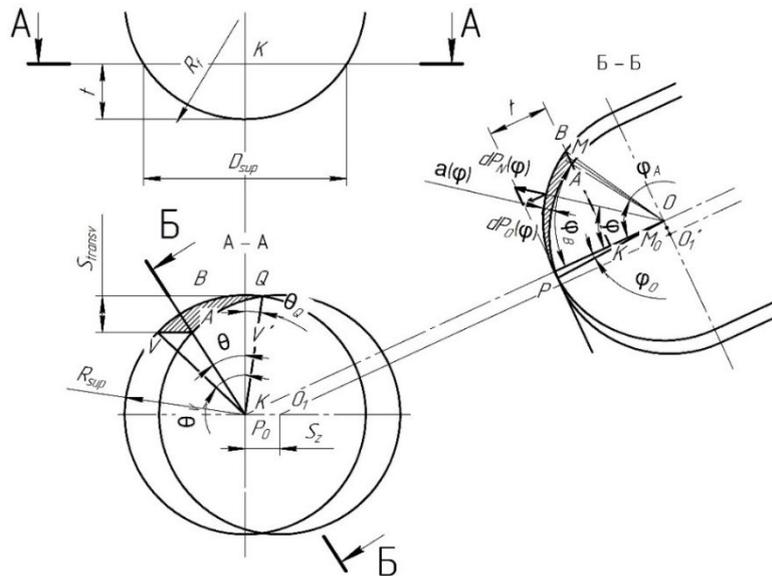


Рис. 2. Схема расчета параметров срезаемого слоя

На рис. 2 показаны: точка O – центр фрезы текущего реза; точка O_1 – предыдущего; R – радиус инструмента; t – глубина резания; s_z – подача на зуб; $a(\varphi)$ – толщина срезаемого слоя, зависящая от угла положения режущей кромки в криволинейном треугольнике ABP .

Предложенная схема расчета позволяет рассчитать величину осевой силы резания, как интеграл по углу φ от точки встречи следов предыдущего и текущего резов – P до точки пересечения следа текущего реза с поверхностью заготовки – B :

$$P_{oc} = C_{pN} \int_{\varphi_0}^{\varphi_B} (\alpha(\varphi)^{0,75} \times R \times \cos \varphi) d\varphi \quad (1)$$

Для расчета необходимо получить формулы расчетов углов φ_0 для точки P , φ_A для точки A и φ_B для точки B . Так как проекция точки P на поверхность резания расположена посередине между O и O_1 , то угол φ_0 будет зависеть от радиуса и величины S_z :

Величина толщины срезаемого слоя $a(\varphi)$ на участке от точки P до точки пересечения следа предыдущего реза с поверхностью заготовки A может быть рассчитана по следующей упрощенной зависимости:

$$a(\varphi) = s_z \cdot \sin \varphi. \quad (2)$$

На участке от точки A до точки B толщина срезаемого слоя $a(\varphi) = R - OM$, где M – произвольная точка на отрезке AB .

Из прямоугольного треугольника OKM имеем: $OM = OK / \cos \varphi$; $OK = R - t$, в результате на отрезке AB

$$a(\varphi) = R - \frac{R-t}{\cos \varphi}. \quad (3)$$

Тогда формула (1) с учетом зависимостей (2) и (3) примет вид:

$$P_{oc} = C_{pN} \left[\int_{\varphi_0}^{\varphi_A} ((S_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi) d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(\left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi \right) d\varphi \right]. \quad (4)$$

из ΔOM_0P :

$$\sin \varphi_0 = \frac{PM_0}{OP} = \frac{s_z/2}{R}$$

или

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{s_z}{2R}; \quad (5)$$

из ΔBKO ($BO = R$):

$$\cos(\varphi_B) = \frac{OK}{OB} = \frac{R-t}{R}$$

или

$$\varphi_B = \arccos \frac{R-t}{R}; \quad (6)$$

из ΔAKO :

$$\operatorname{tg}(\varphi_A) = \frac{AK}{OK} = \frac{BK - AB}{OK} = \frac{BO \cdot \sin(\varphi_B) - OO_1}{R-t} = \frac{\sqrt{2Rt - t^2} - s_z}{R-t}$$

или

$$\varphi_A = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2Rt - t^2} - s_z}{R-t}. \quad (7)$$

Решение задачи

Расчет по формуле (4) с учетом (5) – (7) можно выполнить в любом прикладном пакете, в работе использовался математический пакет Mathcad (табл. 1). Рассчитывалась

осевая составляющая силы резания без учета постоянной C_{pN} , т. е. значение суммы определенных интегралов – y :

$$y = \left[\int_{\varphi_0}^{\varphi_A} ((S_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi) d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(\left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi \right) d\varphi \right] \quad (8)$$

1. Вычисление y – суммы определенных интегралов (8)

Исходные данные для расчета в Mathcad		
$t = 2,5$	$R = 16$	$S_z = \sqrt{0,5^2 + 0,4^2}$
Расчет в Mathcad		
$\varphi_0 = \arccos \left[\sqrt{1 - \left(\frac{S_z}{2 \cdot R} \right)^2} \right]$		$\varphi_0 = 0,02$
$\varphi_B = \arccos \left[\frac{R-t}{R} \right]$		$\varphi_B = 0,567$
$\varphi_A = \operatorname{atan} \left[\frac{(\sqrt{2 \cdot R \cdot t - t^2} - S_z)}{R-t} \right]$		$\varphi_A = 0,532$
$y_0 = \int_{\varphi_0}^{\varphi_A} ((S_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi) d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(\left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi \right) d\varphi$		
$y_1 = \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \cos \varphi \cdot R \cdot \left[R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right]^{0,75} d\varphi$		
$y = y_0 + y_1$		$y = 2,123$

В зоне $\varphi > 0,1$, где $a \gg 0$ справедливо известное соотношение $P_N = (0,4 \div 0,6) P_z$. Неизвестно, каково может быть значение C_{pN} при малых углах контакта – $0,1 > \varphi > 0,1$,

т. к. здесь толщина срезаемого слоя стремится к нулю: $a \rightarrow 0$.

Для определения этого соотношения проанализированы результаты работы [10], в которой был поставлен специальный

эксперимент. Образец из стали 40Х, закаленный до твердости 37...40 HRC, с предварительно нарезанной прямоугольной резьбой шагом 10 мм, закрепляли в трехкулачковом патроне станка и поджимали центром. Твердосплавный резец из сплава Т15К6 с радиусом скругления режущей кромки $\rho_1 = 0,006$ мм устанавливали в специальной тензометрической державке. Для создания эталонных условий свободного резания лезвие резца перекрывало вершину выступа прямоугольной резьбы. Поперечная подача врезания ($S_p = 0,09$ мм/об) осуществлялась непрерывно, при продольном перемещении суппорта с подачей, равной шагу резьбы. Для сопоставления с предшествующими работами по определению силы резания при минимальной толщине срезаемого слоя, скорость резания задавали $v = 0,5$ м/с (30 м/мин). Во время резания фиксировались тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы. С момента касания резца с образцом (рис. 3) обе составляющие силы резания возрастают монотонно до момента начала резания.

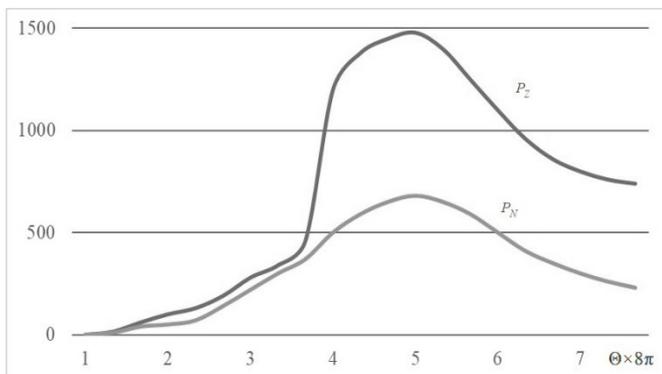


Рис. 3. Экспериментальные зависимости главной P_z и нормальной P_N составляющих силы резания, где Θ – угол поворота образца, отсчитанный от момента касания с инструментом

Момент врезания четко совпадает с резким возрастанием (в 2,5 раза) на осциллограммах главной составляющей силы резания P_z . В это же время радиальная (нормальная) составляющая силы резания P_y продолжала возрастать монотонно.

На участке ($7\pi > \Theta > 8\pi$) сила P_z стремительно возрастает, вследствие начала процесса формирования и отделения стружки от

основного материала заготовки, но при этом сила P_N сохраняет монотонный характер увеличения. Это дает право заявить, что при малых углах поворота шпинделя ($2\pi > \Theta > 7\pi$), соответствующим увеличению толщины срезаемого слоя a от 0 до a_{\min} , при котором начинается процесс резания, соотношение $C_{pN} = 0,4C_{pz\ tab}$ сохраняет силу, но только не к моментальному соотношению, а к табличному значению. Это важно, поскольку срезания стружки еще нет, а нормальная сила, вдавливающая режущий клин в заготовке – есть. В зоне стабильного резания ($8\pi > \Theta > 10\pi$), C_{pN} будет составлять $C_{pN} = (500/1200)C_{pz} = 0,4C_{pz}$, что следует из рис. 3.

Учитывая, что в эксперименте производилось точение с малыми скоростями резания, C_{pN} следует принять по аналогии с классическими работами [1 – 4]: $C_{pN} = 0,5C_{pz}$. Тогда, принимая во внимание справочные данные, получаем для фрезерования сферической фрезой $C_{pz\ tab} = 261$ и, соответственно, максимальное значение осевой силы в рассматриваемом случае (см. рис. 2) $P_{oc} = 2,123 \cdot 0,5 \cdot 261 = 277$ Н.

Заключение

Показано, что для сферической фрезы методика определения осевой силы резания отличается от других инструментов.

Установлено, что при увеличении толщины срезаемого слоя обе составляющие силы резания возрастают монотонно до момента начала резания, но затем главная резко возрастает, а нормальная – монотонно, без скачков.

На конкретном примере показана разработанная методика численного определения осевой силы для сферической фрезы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грубый С.В. Расчет сил и момента резания при фрезеровании концевыми фрезами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 10 (727). doi: 10.18698/0536-1044-2020-10-26-37.
2. Пегашкин В.Ф., Старостин А.П. Повышение точности обработки нежестких деталей в центрах на станках с числовым программным управлением // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2018. Т. 18, № 1. С. 51–57. DOI: 10.14529/engin180106.

3. Shchurov I.A., Nikonov A.V., Boldyrev I.S., Ardashev D.V. SPH modeling of chip formation in cutting unidirectional fiber-reinforced composite // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 10. pp. 883–887.

4. Shchurov I.A., Nikonov A.V., Boldyrev I.S. SPH-simulation of the fiber-reinforced composite workpiece cutting for the surface quality improvement // Procedia Engineering 2016. Vol. 150. pp. 860–865.

5. Kozlov V.N., Zhang J.Y. Strength of Cutting Tool in Titanium Alloy Machining [Electronic resource] // Key Engineering Materials: Scientific Journal. 2016, V. 685: High Technology: Research and Applications 2015 (HTRA 2015). pp. 427–431.

6. Zakovorotny V. L., Gvindjiliya V. E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone // Russian Engineering Research, 2019. 39, no, 5. pp. 423–430.

7. Zagórski I., Kulisz M., Semeniuk A., Malec A. Artificial Neural Network Modelling of Vibration in the Milling of AZ91D Alloy // Advances in Science and Technology Research Journal. Letters 11, Issue 3, pp. 261–269 (2017).

8. Comak A., Budak E. Research on the milling stability of thin-walled parts based on the semi-discretization method of improved Runge-Kutta method // Precision Engineering, Letters 47, pp. 459–468 (2017).

9. Малютин Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 4 (306). С. 74–81.

10. Ямников А.С., Мягков Ю.В. Определение минимальной удельной нормальной силы, необходимой для начала резания // Известия вузов. М: Машиностроение, 1979. № 12. С. 111–115.

REFERENCES

1. Grubiy S.V. Calculation of the cutting forces and torque when milling with end mills / News of higher educational institutions. Mechanical Engineering, 2020, no. 10 (727). Doi: 10.18698/0536-1044-2020-10-26-37.

2. Pegashkin V.F., Starostin A.P. Increase of accuracy of processing of non-rigid parts in centrals on the machine with CNC. Bulletin of the South Ural State University. Ser. «Mechanical Engineering», 2018. vol. 18, no. 1. pp. 51–57. DOI: 10.14529/engin180106.

3. Shchurov I.A., Nikonov A.V., Boldyrev I.S., Ardashev D.V. SPH modeling of chip formation in cutting unidirectional fiber-reinforced composite // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 10. pp. 883–887.

4. Shchurov I.A., Nikonov A.V., Boldyrev I.S. SPH-simulation of the fiber-reinforced composite workpiece cutting for the surface quality improvement // Procedia Engineering 2016. Vol. 150. pp. 860–865.

5. Kozlov V.N., Zhang J.Y. Strength of Cutting Tool in Titanium Alloy Machining [Electronic resource] // Key Engineering Materials: Scientific Journal. 2016, V. 685: High Technology: Research and Applications 2015 (HTRA 2015). pp. 427–431.

6. Zakovorotny V. L., Gvindjiliya V. E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone // Russian Engineering Research, 2019. 39, no, 5. pp. 423–430.

7. Zagórski I., Kulisz M., Semeniuk A., Malec A. Artificial Neural Network Modelling of Vibration in the Milling of AZ91D Alloy // Advances in Science and Technology Research Journal. Letters 11, Issue 3, pp. 261–269 (2017).

8. Comak A., Budak E. Research on the milling stability of thin-walled parts based on the semi-discretization method of improved Runge-Kutta method // Precision Engineering, Letters 47, pp. 459–468 (2017).

9. Malyutin G.E. Definition of cutting forces in finishing sculpted concave surface complex shape spherical mills on CNC machines // Fundamental and applied problems of engineering and technology, 2014, no. 4 (306), pp. 74–81.

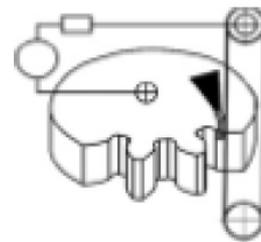
10. Yamnikov A.S., Myagkov Yu.V. Determination of the minimum specific normal force required to start cutting / College Proceedings. Moscow: Mechanical Engineering, 1979, no. 12, pp. 111–115.

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 15.03.2023; одобрена после рецензирования 21.03.2023; принята к публикации 11.04.2023.

The article was submitted 15.03.2023; approved after reviewing 21.03.2023; accepted for publication 11.04.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №6 (144). С.9-19.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №6 (144). P. 9-19.

Научная статья

УДК 621.91

doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-19

Повышение эффективности прорезки глубоких елочных пазов в дисках газовых турбин из жаропрочных сплавов путем применения комбинированного метода гидроабразивной обработки и протягивания

Владимир Федорович Макаров¹, д.т.н.

Михаил Владимирович Песин², д.т.н.

Максим Владимирович Волков³, аспирант

^{1, 2, 3} Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, Пермский край, г. Пермь, Россия

^{1, 3} makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

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

Аннотация. Рассмотрена эффективность применения новой технологии обработки елочных пазов в дисках турбин на основе комбинации операций предварительной вырезки «домика» методом гидроабразивной обработки (ГАО) и окончательного протягивания елочного профиля на станке с ЧПУ в сравнении с методами фрезерования, глубинного шлифования и электроэрозионной обработки. Проблемы, возникающие при изготовлении и эксплуатации протяжек, часто приводят к простоям как основного, так и инструментального производства. При этом неизбежно сдерживаются заданные высокие темпы роста производства газотурбинных двигателей, значительно растут затраты на изготовление комплектов многосекционных елочных протяжек. Для решения проблемы предложено применить различные совмещенные методы обработки, т. е. предварительную вырезку «домика» пазов проводить различными производительными методами вырезки такими, как глубинного шлифования, фрезерования, электроэрозионной и гидроабразивной обработки, а окончательную обработку – методом чистового профильного протягивания. Проведенные предварительные расчеты трудоемкости и затрат производства при сравнительных испытаниях различных совмещенных вариантов предварительной прорезки пазов показали преимущество гидроабразивной вырезки.

В результате проведенных экспериментальных исследований по прорезке пазов гидроабразивным методом и последующим протягиванием окончательными профильными протяжками установлено, что профиль предварительно вырезанного паза с учетом измеренного увода профиля находится в поле допуска перед чистовым елочным профилем окончательной протяжки, что говорит о пригодности вырезанного гидроабразивным методом паза к окончательному протягиванию. После окончательного протягивания елочного профиля проведен электронный контроль и установлено, что все основные размеры в профиле елочных пазов получены в пределах допуска и являются годными по техническим условиям. Предложено провести дальнейшую экспериментальную работу на конкретных серийных дисках турбин, чтобы принять решение о внедрении новой технологии в серийное производство.

Ключевые слова: протягивание, протяжки, елочные пазы, диски турбин, газотурбинные двигатели, гидроабразивная обработка, точность профиля

Для цитирования: Макаров В.Ф., Песин М.В., Волков М.В. Повышение эффективности прорезки глубоких елочных пазов в дисках газовых турбин из жаропрочных сплавов путем применения комбинированного метода гидроабразивной обработки и протягивания // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 9–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-19

Increasing the efficiency of slotting deep fir trees in gas turbine discs made of heat-resistant alloys by applying a combined method of hydroabrasive treatment and broaching

Vladimir F. Makarov¹, D. Eng.

Mikhail V. Pesin², D. Eng.

Maxim V. Volkov³, PhD student

^{1, 2, 3} Perm National Research Polytechnic University, 614990, Permskiy Krai, Perm, Russia

^{1, 3} makarovv@pstu.ru,

² m.pesin@mail.ru

Abstract. The efficiency of the application of a new technology for fir-tree slots treatment in turbine discs based on a combination of pre-slotting operations of the «house» by hydro-abrasive treatment (HAT) and final broaching of the herringbone on a CNC machine in comparison with milling, deep grinding and EDM-ing methods is viewed. Problems arising within manufacturing and operating of broaches often cause down-time of both types: main and tool production. At the same time, the set high growth rates of production of gas turbine engines are inevitably restrained, the costs of manufacturing sets of multi-section fir-tree broaches are significantly increasing. To solve the problem, various combined processing techniques are proposed for the application, i.e., the pre-slotting of the «house» of broaches is carried out by various productive cutting methods such as deep grinding, milling, EDM-ing and HAT, while finishing is carried out using finishing profile broaching technique. The preliminary calculations of labor intensity and production costs carried out during comparative tests of various combined variants of pre-slotting have proved the advantages of HAT cutting.

As a result of the experimental studies, conducted on slotting, using HAT technique with subsequent broaching under final form broach, it was found that channel profile of the preliminary slot with allowances, made for measured profile deviation, is in the tolerable limit before final shape of the final broaching, which bears evidence of the slot appropriateness made by HAT method and its readiness for final broaching. After herringbone final broaching an electronic control was conducted and it was found that all the main dimensions in the herringbones are within tolerance limits and are suitable according to technic specifications. It is proposed to carry out further experimental work on particular stock-produced turbine disks for making a decision on the introduction of a new technology into mass production.

Keywords: broaching, broaches, fir-tree slots, turbine discs, gas turbine engines, hydroabrasive treatment, profile accuracy

For citation: Makarov V.F., Pesin M.V., Volkov M.V. Increasing the efficiency of slotting deep fir trees in gas turbine discs made of heat-resistant alloys by applying a combined method of hydroabrasive treatment and broaching. / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P.9–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-19

Введение

Перед отечественными авиастроителями поставлены задачи в ближайшее время изготовить несколько сотен современных отечественных гражданских самолетов, таких как ТУ-214, Sukhoi Superjet 100 New и МС-21-310 и др. В свою очередь это потребует от авиационных моторостроительных предприятий ускоренного производства большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей, таких как ПС-90А, ПД-8, ПД-14, ПД-35 и др. с характеристиками, не уступающими мировым аналогам газотурбинной техники [1].

Решение этой проблемы на предприятиях моторостроения возможно путем применения новых технологических решений, которые обеспечат существенный рост

производительности изготовления при стабильно высоких параметрах качества и повышения уровня конкурентоспособности газотурбинных двигателей, включая сокращение затрат производства и снижение себестоимости изделий. Наибольшая трудоемкость при обработке деталей газотурбинных двигателей (ГТД) проявляется при изготовлении деталей газовых турбин из жаропрочных никелевых сплавов, особенно дисков и лопаток турбин, имеющих сложные профильные поверхности елочных соединений.

По результатам проведенного анализа литературы и опыта предприятия в стране и за рубежом установлено, что основным, иногда единственным, методом обработки сложных высокоточных глубоких елочных пазов в дисках турбин является процесс протягивания. Трудоемкость операций протягивания

составляет на отдельных деталях 40...50 % от общей трудоемкости механической обработки [2].

Преимущество процесса протягивания перед другими видами механической обработки заключается в том, что помимо высокой производительности происходит одновременная предварительная и окончательная чистовая обработка профиля пазов, стабильно формирующая основные параметры высокой точности и качества поверхностного слоя, обеспечивающие высокую усталостную прочность дисков и лопаток ГТД. Елочные замковые соединения должны обеспечивать заданное расположение пера лопатки в газоздушном тракте для выполнения своего назначения. Поэтому сопряженные поверхности дисков и лопаток должны быть выполнены со следующими высокими параметрами точности (рис. 1, а): допуск на шаги зубьев «елочного» профиля $\pm 0,003$ мм; допуск на перекося и непараллельность профиля зубьев – не более 0,02 мм; допуск на отклонение по углам профиля - 4...15'; величина шероховатости должна соответствовать $Ra \leq 1,25$ мкм. Все эти параметры должны быть обеспечены точностью и качеством изготовления окончательных многосекционных протяжек.



а)



б)

Рис. 1. Диск турбины (а) с протянутыми елочными пазами на универсальном горизонтально-протяжном станке модели 7А540 (б)

На большинстве моторостроительных предприятиях протягивание елочных пазов в

дисках турбин осуществляется в несколько переходов на универсальных горизонтально-протяжных станках типа 7А540 в диапазоне скоростей резания от 1,5 до 6,0 м/мин и длиной хода протяжного блока с многосекционными протяжками 2,0 м (рис. 1, б) [6, 7].

Протяжные блоки станков комплектуются набором последовательно устанавливаемых многосекционных протяжек из быстрорежущих сталей для предварительной прорезки паза в виде «домика» (рис. 2, а) и для формирования елочного профиля паза комплектом окончательных протяжек (рис. 2, б). Скорость протягивания предварительных протяжек не превышает 4,0 м/мин, а на чистовых секциях скорость протягивания обычно снижается до 1,0...2,0 м/мин.



а)



б)

Рис. 2. Общий вид комплектов предварительных (а) и окончательных (б) многосекционных быстрорежущих протяжек для протягивания елочных пазов в дисках

Последовательность предварительного и окончательного протягивания елочных пазов в дисках турбин представлена в табл. 1. Предварительно (с первой по восьмую позицию) в диске протягивается глубокий паз в виде «домика» по генераторной схеме резания, а

окончательно (с девятой по шестнадцатую позицию) формируется елочный профиль паза

остальными чистовыми протяжками по профильной схеме резания.

**1. Схемы предварительного и окончательного протягивания
елочных пазов в дисках турбин**

№ протяжки и блока	Схема предварительного протягивания «домика» паза	№ протяжки	Схема окончательного протягивания елочного паза
1 первый блок		9 третий блок	
2 первый блок		10 третий блок	
3 первый блок		11 третий блок	
4 первый блок		12 третий блок	
5 второй блок		13 четвертый блок	
6 второй блок		14 четвертый блок	
7 второй блок		15 четвертый блок	
8 второй блок		16 четвертый блок	

В связи с увеличением объема производства новых отечественных газотурбинных двигателей возникли проблемы значительного увеличения производства сложных высокоточных протяжек из порошковых быстрорежущих сталей повышенной производительности, особенно для протягивания елочных пазов в дисках газовых турбин.

Эти проблемы связаны с прекращением поставок из-за рубежа заготовок протяжек из прежних применяемых быстрорежущих порошковых сталей, поиском новых поставщиков, испытанием новых марок быстрорежущих сталей, в том числе и для протягивания новых более высокопрочных никелевых сплавов.

Изготовлением таких сложных профильных многосекционных протяжек занимаются традиционно только инструментальные цехи моторостроительных предприятий. Поэтому проблемы при изготовлении и эксплуатации протяжек часто приводят к простоям как основного, так и инструментального

производства. При этом неизбежно сдерживаются заданные высокие темпы роста производства газотурбинных двигателей, значительно растут затраты на изготовление комплектов многосекционных елочных протяжек.

Для уменьшения затрат на подготовку производства и снижения конечной цены изделия на ряде предприятий моторостроения проведены работы по поиску более эффективного (в плане меньших затрат на протяжки) способа прорезки елочных пазов. В основном предлагается применить различные совмещенные методы обработки: предварительную вырезку «домика» пазов проводить различными производительными методами вырезки, а окончательную обработку – методом чистового профильного протягивания, что позволит существенно на 50 % сократить время и затраты на изготовление, настройку и переточку большого числа предварительных

многосекционных прорезных протяжек из дорогостоящих быстрорежущих сталей

В качестве методов предварительной прорезки «домика» пазов предлагается использовать известные в моторостроении методы глубинного шлифования, фрезерования, электроэрозионной и гидроабразивной обработки [3 – 5, 8, 9, 10]. При этом основная работа (80 %) по удалению металла дисков из пазов глубиной около 20 мм ложится на вырезку «домика», а на чистовую профильную протяжку с припуском 1,5...3 мм остается только 20 % работы. Качество поверхностного слоя и точность формирования елочных пазов обеспечивается теми же окончательными профильными протяжками, которые своими первыми режущими зубьями врезаются в предварительно сформированный домик паз.

Методика проведения работы

На первом этапе работы для проведения сравнительных исследований эффективности применения новой совмещенной технологии изготовления елочных пазов в дисках турбин на АО «ОДК – Пермские моторы» предусмотрено провести предварительные расчеты трудоемкости и затрат производства, которые могут возникнуть при сравнительных испытаниях следующих совмещенных вариантов обработки елочных пазов в дисках турбин:

1. Предварительное глубинное шлифование «домика» и финишное протягивание (предложение фирмы «Елб-Шлифф», Германия);

2. Предварительная электроэрозионная прорезка «домика» и финишное протягивание (предложение АО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск, ММПП «Салют», г. Москва);

3. Предварительное фрезерование «домика» и финишное протягивание (предложение фирмы Вальтер, Германия).

4. Предварительная гидроабразивная вырезка «домика» и финишное протягивание (предложение ПНИПУ и АО «ОДК-ПМ», г. Пермь);

5. Сравнение проводится с базовым серийным вариантом предварительного и окончательного протягивания елочных пазов.

Для расчетов оборудование, инструменты и режимы обработки принимались из

имеющихся на предприятии станков, оснастки и производственного опыта.

На втором этапе исследований проводился сравнительный анализ расчетов трудоемкости и затрат на предварительную вырезку всех 110 «домиков» одного диска и выбирался наименее трудоемкий и менее затратный способ предварительной прорезки паза.

На третьем этапе исследований выполнялись эксперименты по прорезке пазов выбранным наиболее эффективным методом на конкретном оборудовании с отработкой режимов и контролем полученного профиля «домика», и последующим протягиванием окончательными профильными протяжками.

Для проведения экспериментов подготовлены призматические образцы 150×150×36 мм из жаропрочного деформируемого никелевого сплава ЭИ698-ВД, применяемые на производстве для контроля и сдачи протяжек (рис. 3, а) с отверстиями для крепления на станке и разработан эскиз паза – «домика» для предварительной вырезки паза (рис. 3, б) с расчетом размеров для свободного вписывания в контур елочного профиля и предотвращения разрушения окончательных елочных протяжек.

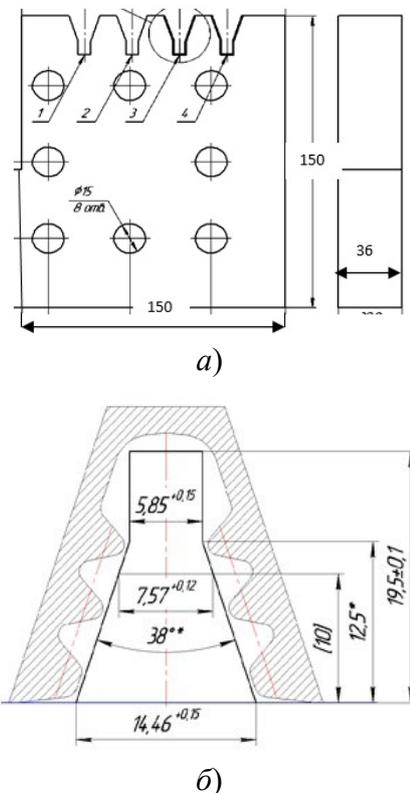


Рис. 3. Эскиз образца для предварительной и окончательной прорезки паза (а) и эскиз предварительного вырезанного «домика», вписанного в чистовой профиль елочного паза (б)

При разработке эскиза «домика» ориентировались на седьмую стадию предварительного протягивания по существующей технологии (см. табл. 1.) с оставленным припуском 2...5 мм на окончательную обработку елочного профиля пазов чистовыми секциями протяжек (8...15 стадии протягивания в табл. 1). На каждом образце обрабатывалось по восемь пазов. Затем проводился контроль пазов и последующая чистовая обработка окончательными протяжками.

Контроль точности предварительно обработанного «домика» и окончательно протянутого елочного профиля на образцах проводился с помощью применяемого на предприятии компьютерного профильного проектора ST-1000 (рис. 4) с автоматической обработкой и записью результатов по специальной программе контроля. Параметры качества поверхностного слоя елочного паза не исследовались, т. к. предполагалось, что качество поверхностного слоя пазов после чистового протягивания окончательными протяжками остается на прежнем уровне.



Рис. 4. Общий вид измерения точности елочных пазов в образцах дисков турбин на профильном компьютерном проекторе ST-1000

Анализ результатов исследований

На первом этапе проведено сравнение различных методов предварительной обработки «домика» елочных пазов путем проведения расчетов эффективности этих технологий.

Расчет эффективности, применяемой базовой технологии предварительного протягивания «домика» пазов. Для расчета принято, что предварительная обработка «домика» пазов проводится по серийному технологическому процессу протягивания пазов диска из

сплава ЭИ698 ВД с числом пазов 110 на горизонтально-протяжном станке модели 7А540 двумя блоками протяжек за два перехода. Обработка глубокого паза проводится по генераторной схеме резания с первой по седьмую позицию (см. табл. 1). Применяются быстрорежущие протяжки из P12Ф2К5М3 на скорости протягивания 2,5 м/мин с длиной хода протяжки 2,0 м. В результате расчета трудоемкость предварительного протягивания 110 пазов с учетом установки, снятия, настройки восьми протяжек в двух блоках составила 373 мин. Стоимость предварительного комплекта протяжек 600000 руб. Стойкость этих протяжек два диска турбины. Число переточек протяжек 4...5.

Расчет эффективности обработки «домика» пазов диска методом глубинного шлифования. Для расчета эффективности принято обработку проводить на имеющемся на предприятии станке модели ELB MICRO CUT 4.520 RT за пять проходов с непрерывной правкой круга профильным алмазным роликом. С учетом длины паза и длины врезания и перебега при диаметре круга 500 мм длина рабочего хода L составит 159 мм. Скорость стола с заготовкой принята 50 мм/мин. Глубина резания по проходам составляет соответственно: 6,5; 5,0; 4,0; 3,0; 1,0. Скорость непрерывной правки $v_{пр} = 0,2$ мкм/об. круга, тогда износ круга по радиусу на 1,0 мм рабочего хода составляет 0,0025 мм, износ круга на все 110 пазов диска составит 220 мм. Тогда при обработке всех в пазов одном диске потребуется три круга диаметром 500 мм. Цена одного круга отечественного производства составляет 1600 руб. (завод «Ильич»). Общее время обработки одного паза за пять проходов с подачей 50 мм/мин составит 16 мин; общее время обработки 110 пазов с учетом времени поворота диска для обработки следующего паза составит 1815 мин или 32 ч.

Расчет эффективности обработки «домика» пазов диска электроэрозионным методом. Для электроэрозионной вырезки пазов выбран имеющийся на предприятии электроэрозионный проволочно-вырезной станок Ажикут 320. Здесь в качестве электрода-инструмента используется латунная твердая проволока без покрытия $\varnothing 0,25$ мм марки HQW250 (производитель Sodick).

Общее время вырезки одного паза (длина реза составляла 68 мм) за три и четыре прохода

составляет соответственно 53 мин и 63 мин. Общее время вырезки за семь проходов составляет 88 мин. Шероховатость поверхности удовлетворяет требованиям чертежа после электроэрозионной вырезки за три прохода. Точность обработки – $\pm 3,0$ мкм. Общее время обработки всех 110 пазов за три прохода составило 1070,5 мин, или 18 ч.

Расчет эффективности обработки «домика» пазов диска методом фрезерования. Для фрезерования пазов выбран универсальный горизонтально-фрезерный станок модели 6М83Н и дисковая двухугловая фреза с пластинками твердого сплава. Обработка ведется за два прохода. Предварительно из опыта предприятия установлено, что стойкость такой фрезы составит не более 40 проходов или 20 пазов, поэтому необходимо использовать три фрезы на все пазы одного диска. Общее штучное время обработки 110 пазов одного диска при длине прохода 60 мм с подачей 10 мм/мин при двух проходах, переустановках и настроек инструментов составило 1452, 5 мин или 24 ч.

Расчет эффективности гидроабразивной вырезки «домика» пазов. Пазы на гидроабразивной установке фирмы DeKartW1313L обрабатывались на следующих режимах:

давление жидкости: 4075 атм; подача режущей головки 30 мм/мин. В качестве абразива использовался гранатовый песок. Расход абразива: 300 г/мин. Время на обработку одного паза длиной контура 46,25 мм 1,5 мин, с учетом настройки, установки, поворота время прорезки всех 110 пазов составит 211,5 мин. При этом расход абразива на один диск составит 63450 г или 65,5 кг. Потребление воды в абразивно-жидкостном режущем устройстве 3,4 л/мин. При уменьшении скорости подачи головки до 14 мм/мин общее время прорезки пазов составит 524 мин.

Для анализа и выбора наиболее эффективного варианта предварительной обработки паза в форме «домик» в дисках турбин полученные результатов расчета сведены в табл. 2. Анализ табл. 2 показывает, что применение вместо операции предварительного протягивания «домика» других методов обработки приводит к существенному росту трудоемкости: при глубинном шлифовании в 3,35 раза; при фрезеровании 3,73 раза; при электроэрозионной обработке (ЭЭО) в 2,87 раза; при ГАО при подаче 14мм/мин в 1,5 раза; при подаче головки 30 мм/мин время вырезки даже меньше в 1,5 раза.

2. Показатели эффективности различных вариантов предварительной прорезки «домика» пазов в диске турбины

Показатели	Протягивание	Шлифование	Фрезерование	Электроэрозия	Гидроабразив
Время обработки	373 мин	1252 мин	1452 мин	1070 мин	524,6 мин (подача 14 мм/мин) 211,5 мин (подача 30 мм/мин)
Затраты на расход инструмента	0,5 комплекта протяжек, 500000 руб.	3 круга – 4800 руб./диск	1 фреза на диск 2000 руб. фреза на диск + 5 переточек – 2000 руб.	Расход проволоки 84 м/диск	Расход абразива 65,5 кг /диск 2620 руб./диск
Затраты на станок	Станок 7А540 или 7Б57 850 тыс.руб.	Станок МикроКат-4 28 млн. руб.	Станок 6М83Н; 300.000 руб.	Станок Ажикут 320; 48 млн. руб.	DeKartW1313L 2,1 млн рублей.

Результаты экспериментальных исследований новой технологии обработки елочных пазов

В результате анализа сравнительных данных эффективности различных вариантов обработки (табл. 2) выбран метод гидроабразивной обработки и принято решение провести экспериментальные исследования новой технологии обработки елочных пазов в дисках турбин путем предварительной вырезки «домика» методом гидроабразивной обработки на гидроабразивной установке DeKartW1313L (рис. 5) при давлении жидкости 4075 атм, подаче головки 30 мм/мин с гранатовым песком и последующем окончательном протягивании профильными чистовыми протяжками.



Рис. 5. Гидроабразивная установка DeKartW1313L с ЧПУ для вырезки пазов

Особенности гидроабразивной резки заключаются в том, что в качестве режущего инструмента используется струя смеси воды и абразивного материала, выпускаемая управляемой ЧПУ гидроголовкой с высокой скоростью и под высоким давлением. Применение гидроабразивной резки для обработки предварительного паза является наиболее перспективным. Этот вид обработки имеет наименьшую трудоемкость из всех рассмотренных способов, а также достаточно существенно может удешевить производство елочных пазов по существующему технологическому процессу.

В результате экспериментальных исследований процесса прорезки гидроабразивом установлено, что при движении струи гидроабразива вдоль вырезаемого паза температура обрабатываемых деталей не изменяется. Микронагрев, вызываемый отделением стружки абразивной частицей, устраняется потоком суспензии, сопровождающим эту абразивную частицу. Небольшая сила давления гидроструи (1...100 Н) и температура (+ 60...+ 90 °С) в зоне

резания исключают деформацию заготовки, оплавление и пригорание материала в прилегающей зоне.

С помощью программы ЧПУ режущая головка с гидроструей жидкости шириной реза 0,2...3,0 мм движется плавно без вибрации, как точечный инструмент по всем поверхностям сложной формы паза и скосам под нужным углом. При этом точность резки по координатам составила 0,01 мм. Мелкая стружка в виде пыли не разбрасывается, а смывается и скапливается на дне бака с водой, гасящей гидрострую.

Одновременно установлено нежелательное появление так называемой конусности паза – при прохождении через толщу материала гидроструя ослабевает, в результате чего на выходе ширина паза меньше, чем на входе. Увод размеров паза по ширине вследствие падения давления приводит к появлению разницы размеров паза на входе струи в заготовку и на выходе. На рис. 6 представлены результаты измерений пазов, полученных на гидроабразивной установке на входе режущей головки и на выходе.

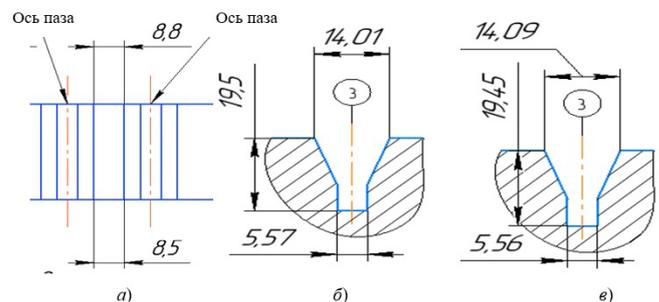


Рис. 6. Результаты измерений пазов, полученных на гидроабразивной установке:

а – на виде сверху; б – на входе струи гидроабразива в паз; в – на выходе из паза

На виде сверху (см. рис. 6, а) по размерам межпазового выступа на входе 8,5 мм и на выходе 8,8 мм видно, что увод профиля пазов после гидроабразивной резки получился в пределах 0,15 мм на сторону. В поперечном сечении на рис. 6, б и рис. 6, в также можно видеть увод струи гидроабразива по ширине дна паза и по высоте паза от 0,01 до 0,05 мм. Однако этого припуска вполне достаточно для обеспечения получения годного елочного профиля при протягивании окончательными протяжками.

Проверка полученного при гидроабразивной обработке профиля на компьютерном

проекторе показала (рис. 7), что профиль вырезанного паза с учетом измеренного увода профиля находится в поле допуска перед чистовым елочным профилем окончательной протяжки, что говорит о пригодности вырезанного гидроабразивным методом паза к окончательному протягиванию.

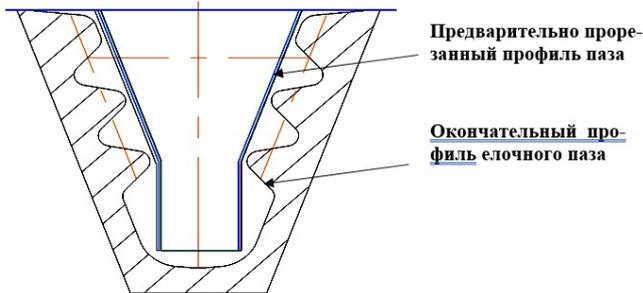


Рис. 7. Результаты измерений на профильном компьютерном проекторе ST-1000 предварительного вырезанного паза («домика») методом ГАО и вписывание его чертежные размеры елочного профиля для окончательного протягивания

На фотографии предварительно обработанных пазов в образцах (см. рис. 8) видно, что пазы после вырезки на гидроабразивной установке получились достаточно ровными, имеют небольшие зарезы по углам доньшка паза и на клиновой части, но в пределах допуска на окончательный профиль. По результатам измерений пазов после вырезки на гидроабразивной установке в отделе технического контроля (ОТК) предприятия полученные образцы пазов признаны годными и получено разрешение к проведению окончательного протягивания елочных пазов.



Рис. 8. Фотография образца с вырезанными предварительным профилем пазами

Протягивание елочного паза окончательными протяжками. Для проведения окончательного протягивания елочных пазов, предварительно вырезанных на гидроабразивной установке, предприятием предоставлен новый более жесткий горизонтально-протяжной станок фирмы Hoffmann RAWMX 25×6300 с ЧПУ и длиной хода 10 м (рис. 9, а). Образцы с

предварительно обработанными пазами устанавливались на штифтах по специальным отверстиям на станине станка и прочно закреплялись (рис. 9, б).



а)



б)

Рис. 9. Общий вид протягивания пазов после предварительной вырезки «домика» паза на горизонтально-протяжном станке RAWMX 25×6300 фирмы HOFFMANN с ЧПУ (а) и установки образцов для протягивания пазов на станке (б)

При протягивании окончательного елочного профиля использовался весь комплект предварительных и окончательных протяжек для безопасности эксперимента и предотвращения разрушения окончательных протяжек. Первые шесть предварительных протяжек прошли по воздуху в прорезанном предварительно «домике» не снимая стружки, а работа начала только седьмая предварительная протяжка своими последними чистовыми зубьями и все последующие окончательные чистовые елочные протяжки. Преимущество станка RAWMX 25×6300 фирмы HOFFMANN с ЧПУ заключается еще в том, что все секции

предварительных и окончательных протяжек вошли в один длинный протяжной блок. В результате протягивание осуществлялось за один ход протяжного блока вместо четырех проходов на универсальном станке 7А540. Протянутые образцы с елочными пазами поступили в ОТК предприятия и прошли тщательную проверку соответствия качества и точности полученных елочных пазов согласно заводским инструкциям.

Результаты контроля протянутого елочного паза на профильном проекторе ST-1000 сформированы в виде актов замера по всем размерам елочного профиля полученных пазов по новой технологии совмещенной обработки – предварительная прорезка «домика» гидроабразивом и окончательное протягивание профиля паза. На фотографиях (рис. 10) представлены пазы в образцах, протянутые предварительно и окончательно.



Рис. 10. Фотография образца с вырезанными предварительным и окончательным профилем пазами

По результатам электронного контроля установлено, что все основные размеры профиля елочных пазов получены в пределах допуска и являются годными по ТУ. Предложено провести дальнейшую экспериментальную работу на конкретных серийных дисках турбин, чтобы принять решение о внедрении новой технологии в серийное производство.

Общие выводы

1. Анализ существующих альтернативных технологий выявил наиболее целесообразное решение – применение предварительной гидроабразивной обработки (ГАО) «домика» и последующая окончательная обработка протягиванием.

2. Установлено, что процесс гидроабразивной резки может быть использован для предварительной вырезки «домика» елочного паза. Применение гидроабразивной резки является перспективным, этот вид обработки имеет наименьшую трудоемкость из всех рассмотренных способов, а также существенно может удешевить производство елочных пазов по существующему технологическому процессу.

3. Основным преимуществом ГАО является независимость от физико-механических свойств жаропрочных никелевых сплавов.

4. Современное оборудование для ГАО обеспечивает высокую точность обработки с относительно высокой производительностью.

5. Внедрение ГАО позволяет обеспечить высокую технологическую гибкость (особенно при освоении новых изделий с относительно невысокими затратами).

6. Высокая производительность ГАО до 300 мм²/мин со скоростью 30 мм/мин обеспечивает высокую скорость вырезки пазов в дисках турбин, не уступающую процессу протягивания.

7. Внедрение предварительной гидроабразивной обработки (ГАО) «домика» и последующей окончательной обработки протягиванием позволит существенно сократить расход предварительных протяжек и с учетом резко возрастающим производством газотурбинных двигателей существенное снижение себестоимости изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Иноземцев А.А.** Авиационный двигатель ПС-90А: А.А. Иноземцев и др., М.: Либра-К, 2007. 320 с.
2. **Макаров В.Ф.** Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 437 с.
3. **Макаров В.Ф.** Резание материалов: учебник. Старый Оскол: ТНТ, 2022. 468 с.
4. **Макаров В.Ф.** Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2013. 320 с.

5. Шманев В. А. и др. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД / В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мцветков. М.: Машиностроение, 1995. 144 с.

6. Балюра П.Г. Протягивание пазов. Машиностроение, 1964. 171 с.

7. Пронкин Н.Ф. Протягивание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1978. 119 с.

8. Полетаев В.А., Цветков Е.В., Волков Д.И. Автоматизированное производство лопаток ГТД: Библиотека технолога. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 262 с.

9. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин [и др.]. М.: Машиностроение, 1984. 64с.

10. Макаров В.Ф., Никитин С.П. Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ // Научно-технические технологии машиностроения. 2018. № 4 (82). С. 21–28.

REFERENCES

1. Inozemtsev A.A. Aircraft engine PS-90A: A.A. Inozemtsev and others, M.: Libra-K, 2007. 320 p.

2. Makarov V.F. Optimization of broaching of hard-to-cut materials: monograph / V.F. Makarov. Stary Oskol: TNT, 2014. 437 p.

3. Makarov V.F. Cutting materials: textbook / V.F. Makarov. Stary Oskol: TNT, 2022. 468 p.

4. Makarov V.F. Modern methods of highly efficient abrasive treatment of heat-resistant steels and alloys: Textbook. St. Petersburg: Publishing house «Lan», 2013. 320 p.

5. Shmanev V. A., et al., Shmanev, V. A., Shulepov, A. P., and Mtsvetkov, A. V. Water jet treatment of GTE parts, Moscow: Mashinostroenie, 1995. 144 p.

6. Balura P.G. Pulling grooves / P.G. Balura. Mashinostroenie, 1964. 171 p.

7. Pronkin N.F. Pulling of hard-to-cut materials / N.F. Pronkin. M.: Mashinostroenie, 1978. 119p.

8. Poletaev V.A., Tsvetkov E.V., Volkov D.I. Automated production of GTE blades: Technologist's Library. M.: Innovative engineering, 2016. 262 p.

9. Deep grinding of parts from difficult-to-machine materials / S.S. Silin [i dr.]. M.: Mashinostroenie, 1984. 64 p.

10. Makarov V.F. Improving the efficiency of profile deep grinding of turbine blades on multi-axis CNC machines. / Makarov V.F., Nikitin S.P. // Science-intensive engineering technologies, 2018, no. 4 (82), pp. 21–28.

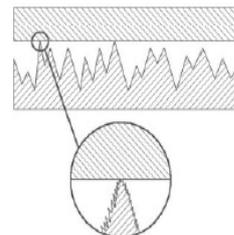
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 06.04.2023; одобрена после рецензирования 18.04.2023; принята к публикации 28.04.2023.

The article was submitted 06.04.2022; approved after reviewing 18.04.2022; assepted for publication 28.04.2023.





Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 20-27.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 20-27.

Научная статья
УДК 621.2.082.18
doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-27

Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения

Виктор Петрович Тихомиров¹, д.т.н.
Михаил Геннадьевич Шалыгин², д.т.н.
Михаил Александрович Измеров³, к.т.н.

^{1, 2, 3} Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия
¹ dm-bgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7269-8175>
² migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>
³ m.izmerov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В зависимости от уровня масштаба измерения сила трения меняет свою природу и определяется разными зависимостями. В работе рассмотрена процедура определения молекулярной составляющей силы трения на основе оценки удельного сопротивления срезу молекулярных связей при упругом взаимодействии иглы кантилевера из нитрида кремния со стальным образцом при сканировании участка поверхности образца в нанометровом диапазоне на атомно-силовом микроскопе AFM «FemtoScan» при малых нагрузках. Зонд атомного силового микроскопа действует как силовой датчик для измерения, в частности, нормальной нагрузки, и изменение силы, прикладываемой к кантилеверу при известной жесткости и величины деформации стержня кантилевера, изменяет нагрузку и на зонд (для оценки молекулярной составляющей силы трения выбиралась трасса самой «гладкой» поверхности). Также в работе дана аналитическая оценка параметров контактного взаимодействия иглы кантилевера в нано-масштабе, представленного в виде сферического индентора, с упругим полупространством, представляющим собой исследуемую поверхность, на основе теории Герца. Анализ данных расчёта и эксперимента по измерению силы сопротивления перемещению индентора при сканировании исследуемой поверхности показал хорошую сходимость результатов с отклонением расчётных значений от данных эксперимента не более 7,5%. Расчёты по установленным формулам показали, что с ростом нагрузки на контакт на наноуровне коэффициент трения снижается из-за более быстрого роста пятен контакта в упругом состоянии (при условии, что наклон неровностей, относящихся к субшероховатости, остается постоянным), что также было подтверждено в процессе эксперимента.

Ключевые слова: адгезия, коэффициент трения, контактная нагрузка, шероховатость, упругий контакт

Для цитирования: Тихомиров В.П., Шалыгин М.Г., Измеров М.А. Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 20–27. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-27

Contact model and evaluation of friction force molecular component

Viktor P. Tikhomirov¹, D.Eng.
Mikhail G. Shalygin², D.Eng.
Mikhail A. Izmerov³, C.Eng.

^{1, 2, 3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia
¹ dm-bgtu@yandex.ru
² migshalygin@yandex.ru
³ m.izmerov@yandex.ru

Abstract. According to the level of the measurement scale, the friction force changes its nature and is determined by different dependencies. The paper views a procedure for determining a friction force molecular component based on the evaluation of specific shearing resistance of molecular links under the elastic interaction of a silicon nitride cantilever needle having a steel sample, used for scanning a section of a sample surface in the nanometer range with an atomic force microscope (AFM) «FemtoScan» under low loads. A sensitive element (measuring device) of an atomic force microscope acts as a force sensor for measuring both: a normal load very roughly, and a change in the force, applied to the cantilever under known stiffness, including the value of the cantilever rod form alteration. It also changes the load on the sensitive element (to assess the molecular component of the friction force, the route of the «smoothest» surface itself was chosen). The paper also provides an analytical assessment of the contact interaction parameters of a cantilever needle in a nano-scale, represented as a spherical indenter, with an elastic half-space as a surface under study, based on the Hertz theory. Analysis of the calculation and experiment data on measuring the resistance force of the indenter during scanning of the surface under study, showed good convergence of the results with a deviation of even values from the experimental data of no more than 7,5 %. Calculations using the established formulas showed that with an increase in the load on the contact at the nanoscale, the coefficient of friction decreases due to a faster growth of contact spots in the elastic state (provided that angularity of inequalities related to sub-roughness remains constant), which was also confirmed in the course of the experiment.

Keywords: adhesion, slip coefficient, contact load, roughness, elastic contact

For citation: Tikhomirov V.P., Shalygin M.G., Izmerov M.A. Contact model and evaluation of friction force molecular component / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 20–27. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-27

Введение

В настоящее время, требования к качеству поверхностей ужесточаются, и они становятся более «гладкими». При увеличении площади контакта поверхности находятся при малых давлениях, таких как микро электромеханические системы (MEMS) и нано электрические системы (устройства NEMS). Размеры пятен контакта шероховатых поверхностей, которые определяют фактическую область контакта, уменьшаются, достигая нанометрового масштаба [2]. Таким образом, становится важно понять, как свойства материалов и топографические особенности поверхностей влияют на силы трения в нано масштабе.

Сила трения F_f является тангенциальной силой сопротивления относительно движению двух поверхностей, которые прижаты друг к другу нормальной силой. Амонтон, в 1699 г., и Кулон в 1785 г., развили феноменологическое понимание сухого трения между двумя телами, находящимися в относительном движении. Трение по Амонтону-Кулону характеризуется тем, что отношение силы трения (во время скольжения) к нормальному действию силы F_N является константой, названной коэффициентом кинетического трения f . Так же коэффициент статического трения – отношение максимальной

силы сдвига в пределах предварительного смещения к нормальной силе. Эксперименты показывают, что статическое трение несколько больше, чем динамическое трение. Несмотря на то, что феноменологически закон трения выражается простой зависимостью

$$F_f = fF_N,$$

природа силы трения недостаточно хорошо понята.

Трение шероховатых поверхностей

Адгезионная теория трения Боудена-Тейбора связывает шероховатость с трением другим способом [4]. Поскольку реальные поверхности всегда обладают определенной степенью шероховатости, то контакт между двумя телами происходит на отдельных пятнах. Таким образом, реальная область контакта обычно будет намного меньше, чем очевидная область контакта и среднее нормальное напряжение в реальной области контакта может превысить твердость материала. Если каждое пятно при взаимодействии шероховатых поверхностей находится в пластическом состоянии, то нормальное напряжение контакта постоянное, и фактическая область контакта пропорциональна нормальной силе. Таким образом, адгезионная теория

трения, которая определяет силу трения, пропорциональную реальной области контакта, также дает необходимую пропорциональность между силой трения и нормальной силой, что соответствует теории трения Амонтона-Кулона. Однако даже в отсутствие пластической деформации, реальная область контакта почти пропорциональна нормальной силе, если у высот неровностей есть статистическое распределение высот (Гринвуд и Вильямсон, [5]). Таким образом, Тейбор [4] указал на следующие три основных фактора, влияющих на трение несмазанных твердых тел:

1. Фактическая площадь контакта между поверхностями.
2. Тип и сила молекулярной связи взаимодействующих твердых тел.
3. Сдвиг и разрыв материала в области контакта.

Эти основные факторы могут быть сильно зависимы от присутствия окисных пленок, размеров пятен контакта и температурных эффектов. При рассмотрении закономерностей трения следует различать модели контакта отдельных неровностей, т. е. поведение отдельного пятна контакта, нагруженного нормальной и тангенциальной силами, а также модели, состоящие из множества пятен касания. Важным представляется нахождение ответа на вопрос – если известен закон (закономерность) трения на отдельном пятне контакта, то будет ли он адекватен для множественного контакта. Анализ литературных данных указал на неоднозначность этого утверждения.

Известное решение для отдельного контакта между двумя упругими телами было развито в конце девятнадцатого века Герцом. Для множественного контакта были разработаны различные статистические модели. Модель GW (Гринвуда-Вильямсона, [5]) рассматривает упругий контакт между шероховатой и гладкой поверхностью, полагая, что:

- 1) грубая поверхность изотропная;
- 2) неровности в своей верхней части сферические;
- 3) все вершины выступов шероховатости имеют один и тот же радиус кривизны, в

то время как их высоты варьируются случайным образом;

4) отсутствует взаимодействие между соседними пятнами контакта;

5) деформация основания неровностей отсутствует.

Гринвуд и Трипп [6] показали, что контакт двух шероховатых поверхностей может быть заменен контактом тела, имеющего эквивалентную шероховатость, с гладкой поверхностью. Одним из интересных и важных результатов, полученных с помощью модели GW , состоит в том, что фактическая площадь контакта примерно пропорциональна нормальной силе. Таким образом, если удельное сопротивление срезам τ молекулярных связей постоянно, то сила трения пропорциональна реальной области контакта, и, следовательно, сила трения будет примерно пропорциональна нормальной силе:

$$F_f = \tau A_r; A_r \propto F_N.$$

Анализ приведенных выше соотношений показал [3], что коэффициент трения практически не зависит от нормальной нагрузки. Однако экспериментальные данные показывают, что существуют отклонения в оценке трения, когда область контакта изменяется от микро- до нано-масштаба. Эксперименты, в которых сила трения измеряется, используя атомный силовой микроскоп (AFM), показывают, что сила трения может быть не пропорциональной нормальной силе. Типичный радиус контакта для зонда AFM оценивается величиной < 25 нм, тогда как измерение шероховатости инженерных поверхностей производится зондом (щупом) радиусом $5 \dots 10$ мкм.

Профили поверхности, измеренные разными способами (с разными размерами зонда) показаны на рис. 1. Так как модели поверхности строятся на основании анализа топографических параметров, то использование данных измерения поверхности зондами разных размеров при решении задач контактной механики могут привести к получению неадекватных результатов.

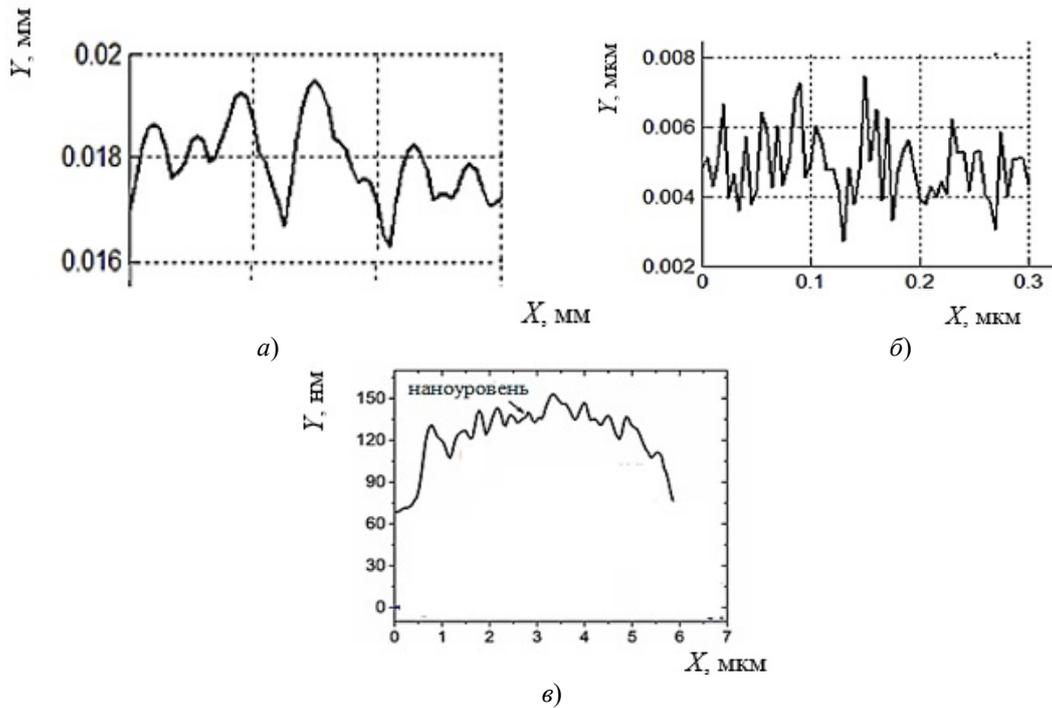


Рис. 1. Профилограммы поверхности:
а – радиус шупа 100 мкм; б – радиус шупа 5 мкм; в – профиль на наноуровне с радиусом иглы 30 нм [1]

Нано уровень шероховатости

Микровзаимодействия отдельных неровностей (вверху) и нано взаимодействие между зондом атомного силового микроскопа (AFM) и исследуемой поверхностью представлены на рис. 2.

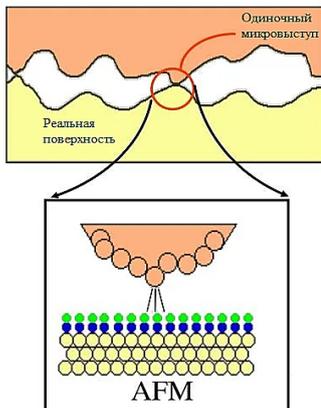


Рис. 2. Разный уровень взаимодействия твердых тел

Целью исследования было установить сдвиговую прочность молекулярных соединений и зависимость трения от нагрузки.

Исследования на атомно-силовом микроскопе AFM «FemtoScan»

Зонд атомного силового микроскопа действует как силовой датчик для измерения, в

частности, нормальной нагрузки. Изменение силы, прикладываемой к кантилеверу (рис. 3) [7], при известной жесткости и величине деформации стержня кантилевера, изменяет нагрузку и на зонд (в данном примере нагрузка на зонд составляла 1,0 нН). Для оценки молекулярной составляющей силы трения выбиралась трасса самой «гладкой» поверхности.

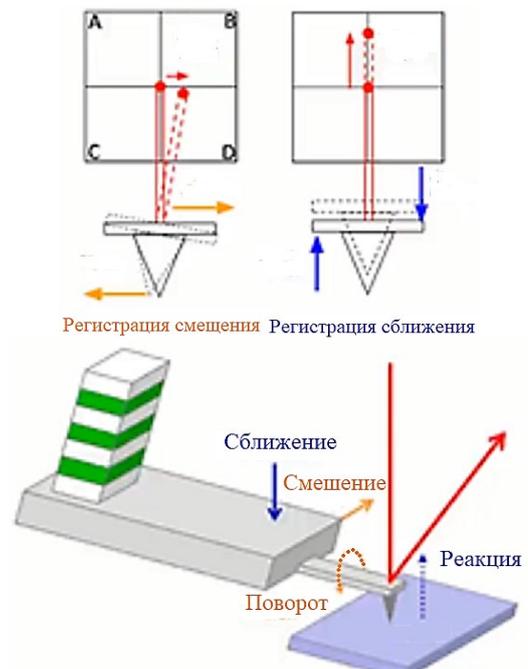


Рис. 3. Силовые нагрузки на иглу кантилевера в процессе измерения

Сила трения измерялась за счет фиксации отклонения кантилевера во время

прохождения зонда по поверхности в прямом и обратном направлениях (рис. 4).

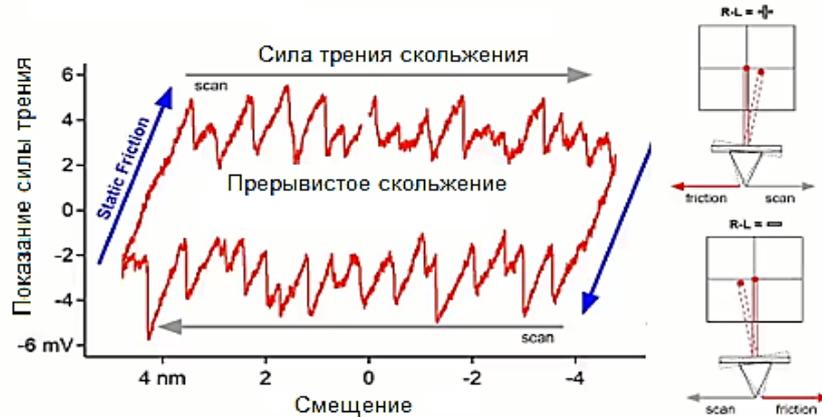


Рис. 4. Результат измерения силы трения

Атомно-силовой микроскоп AFM «FemtoScan» представлен на рис. 5. Образец помещается в микроскоп на подвижный стол и подводится вверх к игле кантилевера из нитрида кремния с радиусом закругления 20 нм. При заданной нагрузке на кантилевер, например, в 1,0 нН, происходило сканирование поверхности образца и запись его трёхмерной топографии на уровне субмикрощероховатости на участке размером 9,5x9,5 мкм с шагом в 20 нм с регистрацией силы трения в виде отклонения иглы кантилевера при прямом и обратном проходе.

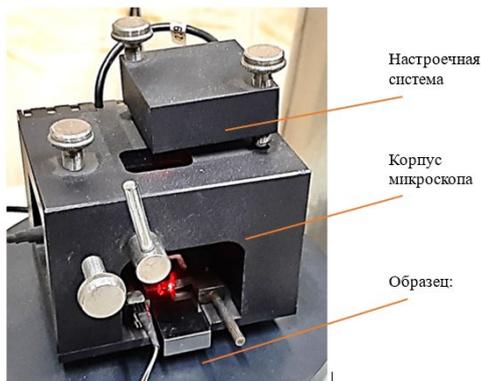


Рис. 5. Атомно-силовой микроскоп AFM «FemtoScan»

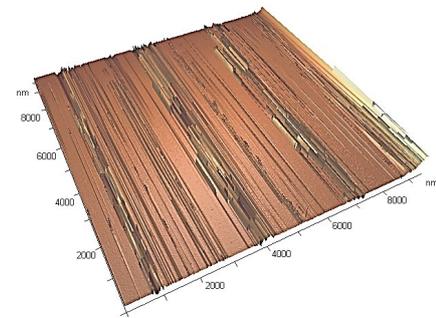


Рис. 6. Топография участка поверхности

С помощью атомного силового микроскопа получена топография участка поверхности образца и проведен анализ исследуемого участка. Характеристика зонда и нагрузочного на кантилевер режима были следующими: радиус зонда равен 20 нм; материал зонда – нитрид кремния; нагрузка на зонд составляла 1,0 нН. Участок 3D поверхности показан на рис. 6.

Профиль поверхности (рис. 7) дает возможность оценить параметры нано-шероховатости.

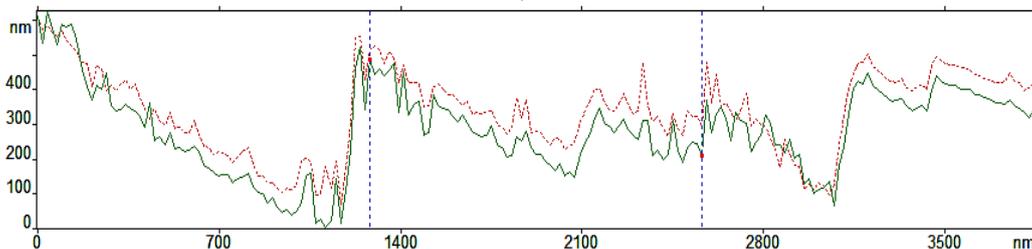


Рис. 7. Профиль поверхности

Испытания были проведены с образцом из стали 45. В результате получена следующая картина изменения силы трения (рис. 8) при

движении в прямом и обратном направлениях (гистерезис).

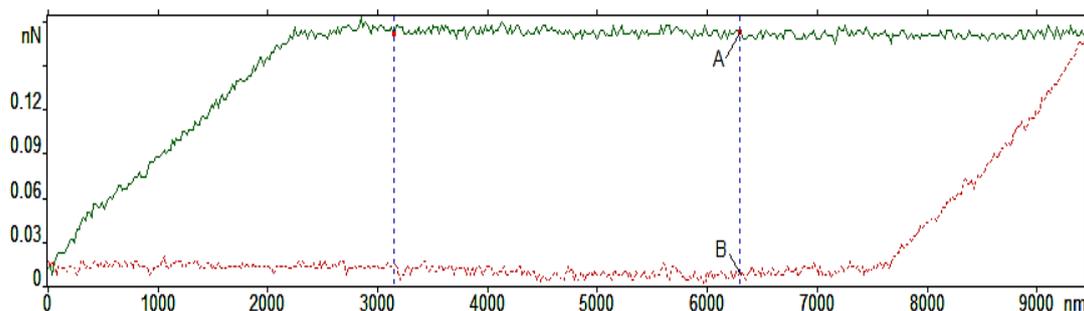


Рис. 8. Зависимость силы трения в прямом и обратном направлениях (сила трения равна половине отрезка AB и составляет 0,078 нН)

Рассмотрим контактное взаимодействие поверхности из стали 45 и иглы, изготовленной из нитрида кремния. Физико-механические характеристики материалов иглы и поверхности

приняты в соответствии с табл. 1. Модель контактного взаимодействия [7] представлена на рис. 9.

1. Физико-механические характеристики

Материал	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона μ
Сталь	$2,0 \cdot 10^5$	0,3
Нитрид кремния Si_3N_4	$3,4 \cdot 10^5$	0,3

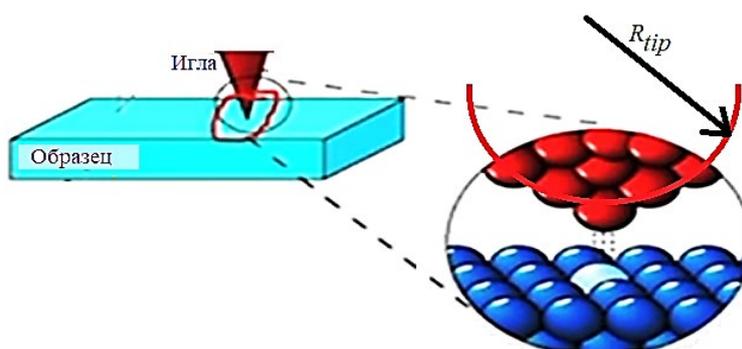


Рис. 9. Модель взаимодействия

Дадим оценку параметров контактного взаимодействия иглы с упругим полупространством. Исходные данные расчёта, следующие: радиус иглы $R_{tip} = 20$ нм; нагрузка на

иглу $F_N = 1,0$ нН.

Приведем результаты расчета, основанные на упругом контактном взаимодействии иглы кантилевера и поверхности образца:

- приведенный модуль упругости:

$$E_{tot} = \left[\frac{3}{4} \left(\frac{1 - 0,3^2}{2,0 \cdot 10^5} + \frac{1 - 0,3^2}{3,4 \cdot 10^5} \right) \right]^{-1} = 1,845 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2;$$

- радиус площадки контакта по Герцу:

$$r_{Hertz} = \left(\frac{R_{tip} F_N}{E_{tot}} \right)^{1/3} = \left(\frac{20 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-9}}{1,845 \cdot 10^{11}} \right)^{1/3} = 4,767 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,4768 \text{ нм};$$

- величина сближения:

$$\delta_{Hertz} = \frac{r_{Hertz}^2}{R_{tip}} = \frac{0,4768^2}{20} = 0,011 \text{ нм};$$

- контактное давление:

$$p = \frac{F_N}{\pi r_{Hertz}^2} = \frac{1 \cdot 10^{-9}}{\pi \cdot 0,4768^2} = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ Н/нм}^2 = 1400 \text{ МПа};$$

- площадь «пятна» контакта:

$$a_{nano} = \pi r_{Hertz}^2 = \pi \cdot 0,4768^2 = 0,714 \text{ нм}^2;$$

- удельное сопротивление срезу молекулярных связей:

$$\tau = \frac{F_f}{a_{nano}} = \frac{0,078 \cdot 10^{-9}}{0,714 \cdot 10^{-12}} = 109 \text{ МПа}.$$

Коэффициент трения [8, 10], как аддитивная величина, определяется выражением:

$$f = \frac{\tau}{p} + \text{tg}\theta_{nano}.$$

Результаты эксперимента

Результаты проведенного эксперимента на атомно-силовом микроскопе по измерению силы трения между образцом и иглой при разной нагрузке на иглу кантилевера представлены на рис. 10. Результаты расчета по представленным выше зависимостям для приведенного образца даны пунктирной линией.

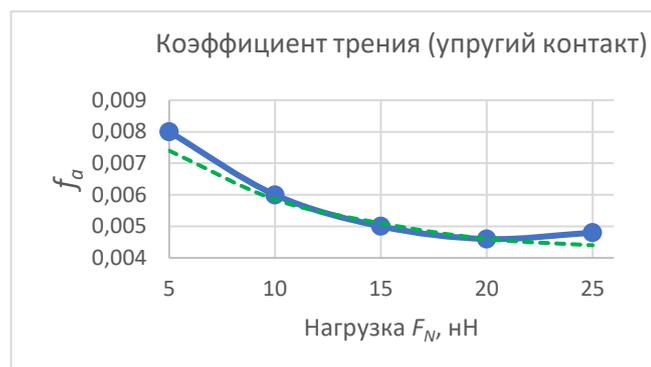


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения от нагрузки на нано уровне

Анализ полученного выражения показывает, что с ростом нагрузки коэффициент нано-трения падает (при условии, что наклон неровностей, относящихся к субшероховатости, остается постоянным).

Выводы

Таким образом, в работе рассмотрена процедура определения удельного сопротивления срезу молекулярных связей и показано, что с ростом нагрузки на контакт на наноуровне коэффициент трения снижается, что подтверждается экспериментальными данными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трошин А.А. Математическая модель измерения шероховатости сферическим щупом / А.А. Трошин, О.В. Захаров / Вестник БГТУ, 2020. №2 (87). С. 28–33.
2. Буяновский И. А., Левченко В. А., Самусенко В.Д. Исследование структуры, состава и трибологических характеристик наноструктурных монокристаллических покрытий, полученных ионно-плазменным методом // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. № 4 (130). С. 41–48.
3. Тихомиров В.П., Измеров М.А., Кузнецов С.В., Горностаева А.Г. Трение металл-металлических поверхностей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. № 3 (129). С. 40–48.
4. Tabor D. Friction – the present state of our understanding. // ASME journal of lubrication technology, 1981. Vol. 103. pp. 169–179.
5. Greenwood J.A. Contact of nominally flat surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson / Proceedings of the royal society of London. Series A, Mathematical and physical sciences, 1966. Vol. 295. № 1442. pp. 300–319.
6. Greenwood J.A. The contact of two nominally flat rough surfaces / J.A. Greenwood, J.H. Tripp / Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1971. № 185. pp. 625–633.

7. Adams G.G. A nano-scale multi-asperity contact and friction model / G.G. Adams, S. Müftü, N.M. Azhar / Journal of tribology, ASME transactions, 2002. P. 1–21.

8. Измеров М.А. Изнашивание фрактальных поверхностей при малых нагрузках / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров, А.Г. Горностаева // Сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей. Брянск, 2022. С. 38–42.

9. Маджумдар А. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей / А. Маджумдар, Б. Бхушан // Современное машиностроение. Сер. Б., 1991. № 6. С.11–23.

10. Измеров М.А., Тихомиров В.П. Трение фрактальных поверхностей // Транспортное машиностроение. 2022. № 1-2 (1-2). С. 20–28.

REFERENCES

1. Troshin A.A. Mathematical model of roughness measurement using a spherical probe / A.A. Troshin, O.V. Zakharov / Bulletin of BSTU, 2020, no. 2 (87), pp. 28–33.

2. Buyanovskiy I. A., Levchenko V. A., Samusenko V.D. Investigation of the structure, composition and tribological characteristics of nanostructured monocrystalline coatings obtained by ion plasma technology / Science-intensive technologies in machine-building, 2022, no. 4 (130), pp. 41–48.

3. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A., Kuznetsov S.V., Gornostaeva A.G. Friction of metal surfaces / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 3 (129), pp. 40–48.

4. Tabor D. Friction – the present state of our understanding. // ASME journal of lubrication technology, 1981. Vol. 103. pp. 169–179.

5. Greenwood J.A. Contact of nominally flat surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson / Proceedings of the royal society of London. Series A, Mathematical and physical sciences, 1966. Vol. 295. № 1442. pp. 300–319.

6. Greenwood J.A. The contact of two nominally flat rough surfaces / J.A. Greenwood, J.H. Tripp / Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1971. № 185. pp. 625–633.

7. Adams G.G. A nano-scale multi-asperity contact and friction model / G.G. Adams, S. Müftü, N.M. Azhar / Journal of tribology, ASME transactions, 2002. P. 1–21.

8. Izmerov M.A. Wear process of fractal surfaces at low loads / M.A. Izmerov, V.P. Tikhomirov, A.G. Gornostaeva / Collection of scientific articles of the 14-th International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Bryansk Scientific School of Engineering Technologists. Bryansk, 2022, pp. 38–42.

9. Majumdar A. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces / A. Majumdar, B. Bhushan. Modern machine-building. Ser. B., 1991, no. 6, pp.11–23.

10. Izmerov M.A., Tikhomirov V.P. Friction of fractal surfaces / Transport engineering, 2022, no. 1-2 (1-2), pp. 20–28.

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 31.01.2023; принята к публикации 08.02.2023

The article was submitted 26.12.2022; approved after reviewing 31.01.2023; assepted for publication 08.02.2023



Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 28-37.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 28-37.

Научная статья

УДК 678/620.178.169

doi: 10.30987/2223-4608-2023-28-37

Абразивная износостойкость и ресурс эксплуатации труб из стеклокомпозита

Сергей Викторович Иванов¹, аспирант

Вадим Александрович Антошин², аспирант

Денис Александрович Мельников³, аспирант

Али Юсупович Албагачиев⁴, д.т.н.

^{1, 2} ООО «Новые Трубные Технологии», Москва, Россия;

^{1, 2, 3, 4} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук», Москва, Россия.

¹ ivanov@ntt.su, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² antoshin@ntt.su, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ melnikov@ntt.su, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ albagachiev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6874-0561>

Аннотация. В данной статье представлены исследования абразивной износостойкости внутренней поверхности стеклокомпозитных труб, которые прокладываются по технологии микротоннелирования при строительстве водопроводов питьевой воды, ирригационных и канализационных систем. Благодаря очень гладкой внутренней поверхности, трубы имеют высокий коэффициент скорости прохождения жидкости по трубе и низкий коэффициент шероховатости. При длительной эксплуатации перемещения воды и твердых частиц по трубопроводу в конечном итоге приводит к износу внутренних стенок трубы. Изучение данных по абразивному износу и абразивной стойкости стеклокомпозитных труб позволяет рассчитывать работоспособность трубопровода при заданных условиях, прогнозировать срок безаварийной эксплуатации трубопроводов, а также проводить обоснованный выбор материала для изготовления трубопровода. В качестве объектов исследования были выбраны образцы стеклокомпозитных труб, изготовленные ООО «Новые Трубные Технологии» методом непрерывной намотки с внутренним слоем на основе: ортофталевой полиэфирной, изофталевой полиэфирной и винилэфирной смол. Оценка общей износостойкости внутренней поверхности труб проводилась на испытательном стенде по Дармштадскому методу (ГОСТ Р 55877-2013, метод Б). Данный метод позволяет имитировать истирание и износ футеровок и труб, которые могут возникнуть в реальных условиях эксплуатации. В качестве абразивного материала использовался дробленый кварц. По результатам исследований были определены среднеарифметические значения износа и коэффициенты безопасности стеклокомпозитных труб в зависимости от количества испытательных циклов. Данные были использованы для выбора наиболее перспективного материала в качестве полимерной матрицы для производства стеклопластиковых труб для систем водоснабжения и водоотведения.

Ключевые слова: композиционные материалы, стеклокомпозиты, абразивный износ, срок эксплуатации, микротоннелирование, дармштадский метод

Благодарности: Материал подготовлен в рамках научных исследований по договору № К.412-19, заключенного между ООО «Новые Трубные Технологии» и ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», экспериментальные исследования проведены в научно-образовательном центре «Водоснабжение и водоотведение» и в сертифицированном (сертификат соответствия № RU.MCC.212.407.01883) и аккредитованном (аттестат аккредитации №RU.MCC.АЛ.963) научно-исследовательском и испытательном центре «МГСУ СТРОЙ-ТЕСТ»

Для цитирования: Иванов С.В., Антошин В.А., Мельников Д.А., Албагачиев А.Ю. Стойкость к абразивному износу и определение срока эксплуатации труб из стеклокомпозита // 2023. № 6 (144). С. 28–37. doi: 10.30987/2223-4608-2023-28-37

Abrasive wear resistance and service life of pipes made of fiber-glass composite

Sergey V. Ivanov¹, PhD student
Vadim A. Antoshin², PhD student
Denis A. Melnikov³, PhD student
Ali Yu. Albagachiev⁴, D. Eng.,

^{1, 2} LLC "New Pipe Technologies", Moscow, Russia;
^{1, 2, 3, 4} IMS RAS named after A.A. Blagonravov, Moscow, Russia

¹ ivanov@ntt.su

² antoshin@ntt.su

³ melnikov@ntt.su

⁴ albagachiev@yandex.ru

Abstract. This article presents studies of the abrasive wear resistance of fiber-glass composite pipes inner surface, which are laid using microtunneling technology under construction of drinking water pipes, irrigation and sewerage systems. Due to a very smooth inner surface, the pipes have a high coefficient of fluid flow speed transmission through the pipe and a low coefficient of roughness. When in long-term operation, the movement of water and solid particles through the pipeline eventually causes wear of inner walls of the pipe. The study of data on abrasive wear and abrasive resistance of fiber-glass composite pipes allows calculating the pipeline's operability under controlled conditions, predicting the period of trouble-free operation of pipelines and making a reasonable choice of material for pipeline manufacturing. The objects of the study of glass composite pipes samples were selected, manufactured by LLC «New Pipe Technologies» using the method of continuous winding with an inner layer based on: orthophthalic polyester, isophthalic polyester and vinyl ester resins. The assessment of the overall wear resistance of the inner surface of the pipes was fulfilled using test equipment according to the Darmstadt method (GOST R 55877-2013, method B). This method allows simulating the abrasion and wear of linings and pipes that may occur in real operating conditions. Crushed quartz was used as an abrasive material. According to the results of the research, the arithmetic mean values of wear and safety coefficients of fiber-glass composite pipes were determined depending on the number of test cycles. The data were used to select the most promising material as a polymer matrix for the production of fiberglass pipes both for water supply and sewerage.

Keywords: composite materials, fiber-glass composite, abrasive wear, service life, microtunneling, Darmstadt method.

Acknowledgements: The material was prepared within the framework of scientific research under contract No. K.412-19, concluded between LLC «New Pipe Technologies» and «NRU MGSU», experimental studies were conducted in the scientific and educational center «Water supply and disposal», certified (certificate compliance No. RU.ICS.212.407.01883) and authorized (accreditation certificate No.RU.ICS.AL.963) research and testing center «MGSU STROY-TEST».

For citation: Ivanov S.V., Antoshin V.A., Melnikov D.A., Albagachiev A.Yu. Abrasive wear resistance and service life of pipes made of fiber-glass composite / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 28–37. doi: 10.30987/2223-4608-2023-28-37

Введение

С начала XXI века изделия из стеклоком-
позитов составляют все большую конкурен-
цию в строительной промышленности таким
материалам как сталь, чугун, полиэтилен, по-
липропилен, железобетон и другое, благодаря
своим высоким механическим и эксплуатац-
ионным характеристикам. В частности, стекло-
композит нашел применение как материал для
изготовления труб при сооружении водопрово-
дов, трубопроводов бытовой канализации, про-
мышленных и других водостоков. Для произ-
водства водопроводных и канализационных
труб большого диаметра до 4000 мм обычно
используются стеклокомпозиты на основе

связующего из полиэфирных или винилэфир-
ных смол. Полиэфиры обладают отличной об-
щей водостойкостью и химической стойко-
стью, а также отличаются устойчивостью к
кислотам. Винилэфирные смолы представляют
собой отдельный тип смол, хотя они отвержда-
ются и перерабатываются так же, как полиэфиры
[1 – 3].

В сфере жилищно-коммунального хозяй-
ства (ЖКХ) одним из наиболее перспективных
методов строительства новых инженерных се-
тей является метод бестраншейной прокладки
– микротоннелирование. Микротоннелирова-
ние позволяет прокладывать трубопроводы и
тоннели без вскрытия поверхности развитой
инфраструктуры и обустройства объездных

путей, что значительно сокращает стоимость и сроки проведения работ. Выбор стеклокомпозитных труб для микротоннелирования определяется сочетанием эксплуатационных требований к трубе, а также оценкой способности трубы и системы соединения труб выдерживать осевые усилия во время монтажа [4 – 8].

После установки трубы должны отвечать строгим требованиям по устойчивости к коррозии, абразивному износу, герметичности самой трубы и соединительных элементов, высоким гидравлическим характеристикам и способности воспринимать значительные нагрузки при усадке грунта в течение всего периода эксплуатации.

Благодаря очень гладкой внутренней поверхности трубы имеют высокий коэффициент скорости прохождения жидкости по трубе и низкий коэффициент шероховатости. В результате скорость прохождения жидкости по трубе на 15 % больше, чем у железобетонных и других типов труб при таком же угле наклона. При длительной эксплуатации перемещения воды и твердых частиц по трубопроводу в конечном итоге приводит к износу внутренних стенок трубы. Скорость и степень износа зависят от свойств абразивного материала, таких как гранулометрический состав, химический состав, скорость прохождения абразивного материала через трубу и другие [9]. В связи с этим, абразивный износ или истирание в системах водоотведения является одним из основных критерием оценки срока службы труб.

Целью данной работы являлось изучение данных по абразивному износу и абразивной стойкости стеклокомпозитных труб, изготовленных на основе различных полимерных матриц. В результате исследований будет

рассчитана работоспособность трубопровода при заданных условиях, спрогнозирован срок безаварийной эксплуатации трубопроводов, а также проведен обоснованный выбор материала для изготовления трубопровода.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана стеклокомпозитная труба для микротоннелирования, изготовленная методом непрерывной намотки с внутренним слоем на основе:

- изофталевой полиэфирной смолы (образец № 1);
- ортофталевой полиэфирной смолы (образец № 2);
- винилэфирной смолы (образец № 3).

Образцы для испытаний представляли собой отрезки труб (диаметр DN 400 мм, рабочее давление PN 0,6 МПа, кольцевая жесткость SN 5000 Па), торцы которых были гладкими, ровными и перпендикулярными оси трубы. Верхняя часть отрезков трубы была срезана на половину диаметра плоскостью, параллельной продольной оси трубы. С торцов образцы герметично перекрывались пластинами, являющимися частью испытательного стенда.

Длина образца была принята 1000 ± 10 мм по ГОСТ Р 55877-2013. Количество образцов для испытаний трубной продукции одного наименования – 1 шт. Исходные трубы изготовлены в соответствии ТУ 22.21.21-004-99675234-2019 [10, 11].

Перед проведением испытаний были измерены: длина каждого образца; внутренний диаметр; толщина стенки с точностью $\pm 0,5$ мм. Численные значения измерений представлены в табл. 1.

1. Геометрические характеристики образцов

Номер образца	Внутренний диаметр, мм	Длина, мм	Толщина стенки, мм
1	$405,2 \pm 0,5$	$1000 \pm 0,5$	$8,2 \pm 0,5$
2	$405,2 \pm 0,5$	$1000 \pm 0,5$	$8,2 \pm 0,5$
3	$406,6 \pm 0,5$	$1000 \pm 0,5$	$6,9 \pm 0,5$

Испытания выполнялись на экспериментальной установке, состав, основные характеристики и схема которой описаны в ГОСТ Р 55877-2013 (метод Б – Дармштадский метод).

Принципиальная схема испытательного стенда, позволяющего имитировать истирание и износ футеровок и труб, которые могут возникнуть в реальных условиях эксплуатации представлена на рис. 1.

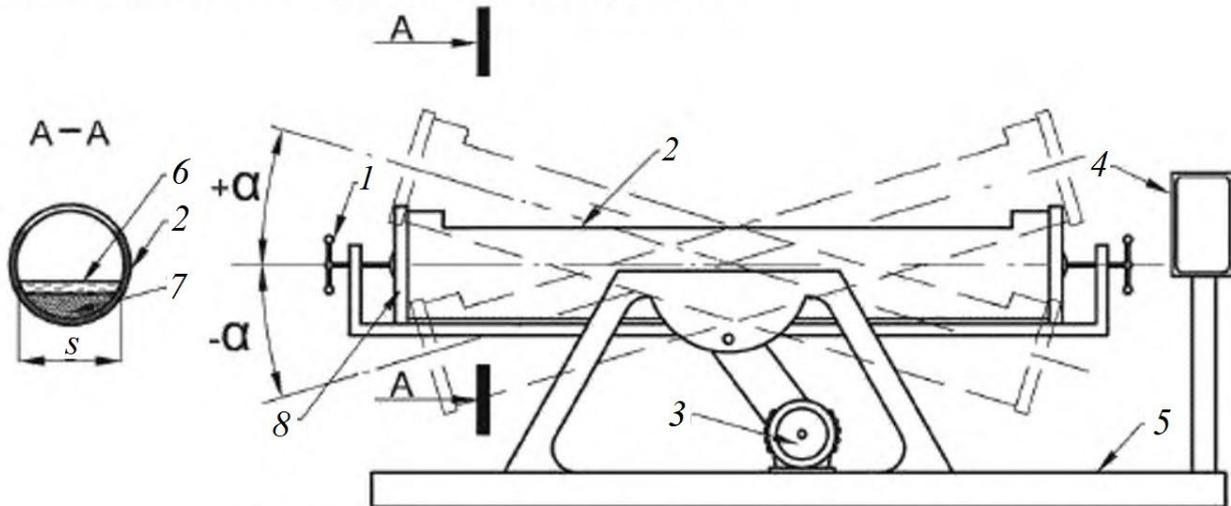


Рис. 1. Принципиальная схема испытательного стенда по ГОСТ Р 55877-2013 (метод Б):

1 – устройство фиксации торцевых пластин; 2 – образец для испытаний; 3 – привод; 4 – устройство управления; 5 – основание стенда; 6 – уровень воды; 7 – абразивный материал; 8 – торцевая пластина; s – ширина зеркала воды; $\pm \alpha$ – углы отклонения рамы [10]

В данной работе для проведения исследований применяли «Испытательный стенд для выполнения испытаний образцов труб из реактопластов, армированных стекловолокном, по ГОСТ Р 55877-2013 (метод Б)» (заводской номер ДШС-001), который состоит из рамы испытательного стенда с мотором-редуктором, измерительного устройства с индикатором и счетчика импульсов. Стенд оснащен устройствами для фиксации образца, исключающими его возможные смещения в течение всего времени испытаний, и позволяет проводить испытания одновременно трех образцов трубной продукции [12].

В качестве абразивного материала использовался дробленый кварц, изготовленный по ТУ 571726-002-45588031-01, с размером макрогранул 4,0...5,0 мм (условно соответствует зернистости F4 корунда). Фотография просеянного абразивного материала, применявшегося в испытаниях, представлена на рис. 2. Для наполнения одного образца абразивной смесью (кварцит и вода) использовалось 5,8 кг кварцита. Ширина зеркала воды после размещения абразивной смеси составляла 235 ± 3 мм. Такое соотношение абразивного материала и воды обеспечило равномерное перемещение абразивной смеси по поверхности испытуемых образцов.



Рис. 2. Абразивный материал

Перед началом испытаний рама испытательного стенда была установлена в горизонтальном положении. В раме закреплялись образцы с торцевыми пластинами. Изображение установленных образцов представлено на рис. 3.



Рис. 3. Экспериментальный стенд

В «нулевой зоне» каждого образца на расстоянии 20 мм от края были выбраны точки сравнения, не подвергаемые истиранию в процессе испытаний (маскировались армированной лентой). Относительно этих точек была измерена относительная высота контрольных точек до начала испытаний для последующего измерения величины износа.

После проведения измерений образцы были заполнены абразивной смесью, как было описано ранее, а края образцов были закрыты армированной полимерной пленкой для предотвращения выплескивания. Стенд был включен в рабочий режим согласно ГОСТ Р 55877-2013: скорость качаний рамы испытательного стенда составляла 10 ± 2 испытательных циклов в минуту с углом наклона образцов $\pm 22,5^\circ$ относительно горизонтальной плоскости. Таким образом, за один испытательный цикл образцу придавалось угловое перемещение равное 90° . Во время каждого наклона образца, закрепленного в раме испытательной установки, абразивный состав перемещается от одной торцевой пластины к другой, вызывая тем самым абразивный износ в нижней части внутренней поверхности образца.

Относительно выбранной измерительной базы были записаны координаты контрольных точек вдоль продольной линии, параллельной оси трубы, с помощью измерительного устройства ИЧЦ-0-25 0,001 (рис. 4).



Рис. 4. Устройство контроля ИЧЦ-0-25 0,001

Для каждого образца было установлено 69 контрольных точек следующим образом: первая точка в каждом образце располагалась

на расстоянии 160 мм от края трубы, далее контрольные точки располагались с шагом 10 мм (точность не менее $\pm 0,02$ мм). Последняя контрольная точка в каждом образце располагалась на расстоянии 160 мм от второго края образца.

Для измерения количества пройденных испытательных циклов использовался счетчик импульсов СИ20-У.Н.Р. с бесконтактным индуктивным датчиком LA.30-55.P4.U1.K. Суммарное количество испытательных циклов в серии разовых испытаний составляло 200000. Количество испытательных циклов в каждом разовом испытании – 50000. После выполнения каждого разового испытания (при достижении 50000 испытательных циклов, количество которых измерялось счётчиком импульсов) из образцов удалялась абразивная смесь и измерялся износ в каждой контрольной точке (a_i). Помимо этого, визуально определялись и фиксировались признаки повреждения внутренней поверхности образцов.

Чистое время работы испытательного стенда составило 334 ч. Непрерывность работы испытательного стенда контролировалось системой видеонаблюдения и дистанционного управления работой привода.

После проведения испытаний для каждого разового испытания (k) вычисляли среднеарифметическое значение износа по формуле:

$$a_{\text{средн},k} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}, \quad (1)$$

где a_i – износ в каждой контрольной точке, мм;
 n – количество контрольных точек.

Результаты исследования

Значения среднеарифметического износа образцов труб после каждого единичного испытания, которые были рассчитаны на основании измеренных значений износа в контрольных точках для каждой трубы в зависимости от количества испытательных циклов представлены в табл. 2.

График зависимости износа от количества испытательных циклов представлен на рис. 5.

2. Среднеарифметические значения износа по результатам испытаний

Номер образца	Тип образца (маркировка)	Количество испытательных циклов, шт.	$a_{\text{средн},k}$, мм
1	Труба 400-0,6-10000 К (лайнерный слой на основе изофталевой смолы)	50000	0,024
		100000	0,073
		150000	0,187
		200000	0,355
2	Труба 400-0,6-10000 В (лайнерный слой на основе ортофталевой смолы)	50000	0,025
		100000	0,066
		150000	0,111
		200000	0,216
3	Труба 400-0,6-5000 ВЭС (лайнерный слой на основе винилэфирной смолы)	50000	0,008
		100000	0,023
		150000	0,042
		200000	0,065

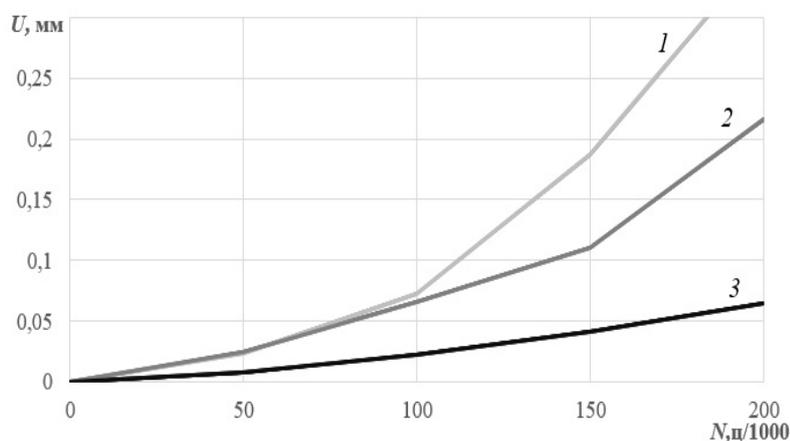


Рис. 5. График износа внутренней поверхности труб:
1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3

На основании полученных результатов в соответствии с пунктом 9.2.3 ГОСТ Р 55877-2013 были рассчитаны коэффициенты безопасности (F_{6k}) стеклокомпозитных труб систем водоотведения в зависимости от количества испытательных циклов по формуле:

$$F_{6k} = \frac{\delta_{\text{л}}}{a_{\text{средн},k}}, \quad (2)$$

где $a_{\text{средн},k}$ – среднеарифметическое значение износа для разового испытания номера k , мм; $\delta_{\text{л}}$ – толщина лайнерного слоя стеклокомпозитной трубы, мм.

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

3. Значения коэффициентов безопасности в зависимости от количества испытательных циклов (толщина лайнерного слоя 1,5 мм)

Номер образца	Тип образца (маркировка)	Количество испытательных циклов, шт.	$F_{\text{БК}}$
1	Труба 400-0,6-10000 К (лайнерный слой на основе изофталевой смолы)	50000	62,50
		100000	20,55
		150000	8,02
		200000	4,23
2	Труба 400-0,6-10000 В (лайнерный слой на основе ортофталевой смолы)	50000	60,00
		100000	22,73
		150000	13,51
		200000	6,94
3	Труба 400-0,6-5000 ВЭС (лайнерный слой на основе винилэфирной смолы)	50000	187,50
		100000	65,22
		150000	35,71
		200000	23,08

Показатель износа, именуемый как «дармштадский ресурс», определялся как длина потока абразивной смеси, вызывающая износ 100 % толщины лайнерного слоя. Предполагалось, что 200 000 испытательных циклов соответствуют пробегу потока взвеси протяженностью 400 км. Для оценки количества испытательных циклов, необходимых для

истирания лайнерного слоя (толщиной 1,5 мм для всех трех образцов), полученные зависимости износа от количества циклов были аппроксимированы к полиномиальным функциям (в степени 2, величина достоверности аппроксимации R^2 составила не менее 0,99). Полученные в графическом виде зависимости представлены на рис. 6.

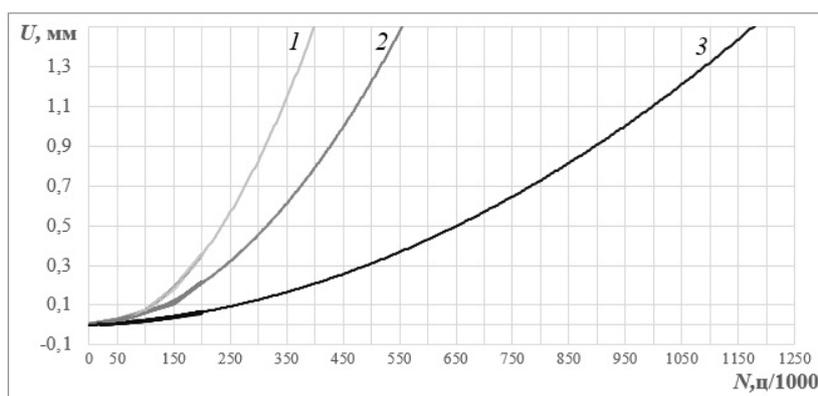


Рис. 6. Зависимости износа внутренней поверхности труб от количества циклов:

1 – полиномиальная, образец № 1 ($R^2 = 0,9986$); 2 – полиномиальная, образец № 2 ($R^2 = 0,9911$); 3 – полиномиальная, образец № 3 ($R^2 = 0,9996$)

По экстраполяции полученных зависимостей было определено предполагаемое количество испытательных циклов, необходимых для разрушения лайнерного слоя каждого образца

(при допущении об устоявшемся характере разрушения лайнера). Результаты определения представлены в табл. 4.

4. Количество испытательных циклов и пробег потока взвеси в испытуемых трубах до полного износа лайнерного слоя

Номер образца	Толщина лайнерного слоя, мм	Количество испытательных циклов, шт.	Пробег потока взвеси, км
1	1,5	402 000	804
2	1,5	537 000	1074
3	1,5	1 276 000	2552

Зная расчетную скорость течения воды на участке самотечного трубопровода, можно определить долговечность лайнерного слоя, выраженную через износостойкость. На рис. 7 представлена зависимость долговечности

(стойкости к истиранию) лайнерного слоя испытываемых труб в зависимости от скорости потока абразивной смеси.

Полученные зависимости, выраженные через функции, представлены в табл. 5.

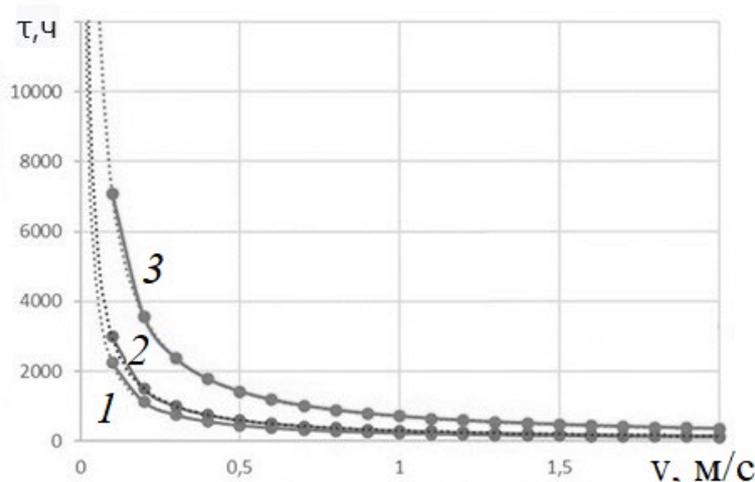


Рис. 7. Зависимость долговечности лайнерного слоя от скорости потока абразивной среды: 1 – образец № 1 ($y = 222,22x^{-1}$); 2 – образец № 2 ($y = 298,33x^{-1}$); 3 – образец № 3 ($y = 708,89x^{-1}$)

5. Зависимость долговечности лайнерного слоя (A) от скорости потока абразивной среды (v_a)

Номер образца	Толщина лайнерного слоя, мм	Пробег потока взвеси, км	Долговечность лайнерного слоя от скорости потока взвеси, ч
1	1,5	804	$A(v_a) = 222,22v_a^{-1}$
2	1,5	1074	$A(v_a) = 298,33v_a^{-1}$
3	1,5	2552	$A(v_a) = 708,89v_a^{-1}$

Кроме этого, проводился визуальный осмотр поверхностей образцов после испытаний (рис. 8 а, б, в). На поверхности образцов

1 и 2 были видны сколы, образовавшиеся при испытании. На образце 3 наличие образовавшихся дефектов носит единичный характер.

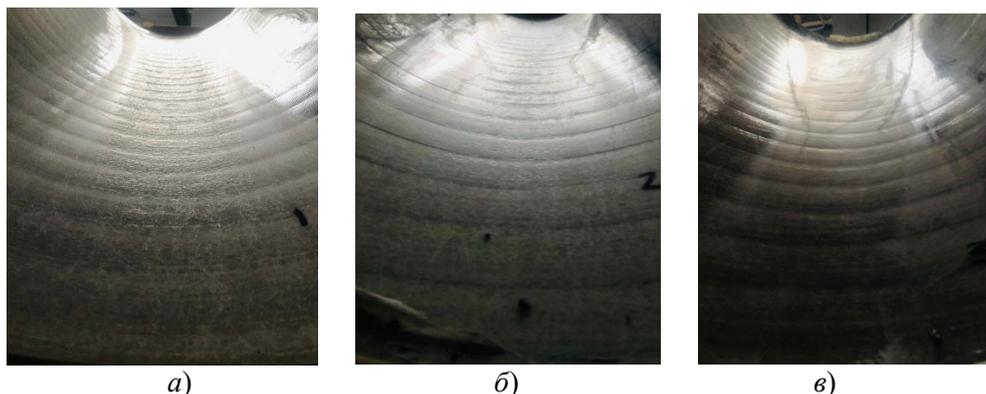


Рис. 8. Внутренняя поверхность после 200 000 испытательных циклов:
а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3

Выводы

По результатам испытаний на определение износостойкости внутренней поверхности стеклокомпозитных труб в соответствии с ГОСТ Р 55877-2013 (метод Б – Дармштадский метод) срок эксплуатации труб составляет не менее 50 лет (эквивалент 100 000 циклов).

Максимальный износ лайнерного слоя за 100 000 циклов составил не более 5 % (0,073 мм). Дополнительно проведенные испытания до 200 000 циклов, показали, что максимальный износ составляет не более 24 % (0,355 мм) от общей толщины лайнерного слоя.

Результаты расчетов были использованы для выбора наиболее перспективного материала в качестве полимерной матрицы при производстве стеклокомпозитных труб для их установки методом микротоннелирования. Стойкость труб с внутренним слоем на основе винилэфирной смолы не менее чем в 2 раза превосходит по абразивной стойкости трубы с внутренним слоем из орто- и изофталевой полиэфирной смолы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бьёркланд И. Пластмассовые трубы, их характеристики и области применения. М.: NPG, 2000. 116 с.
2. Li Hong (Ed.) *Fiberglass Science and Technology: Chemistry, Characterization, Processing, Modeling, Application, and Sustainability*. Springer, 2021. 555 p.
3. Асланова М.С., Колесов Ю.И., Хазанов В.Е., Ходаковский М.Д., Шейко В.Е. Стекловолоконные. М.: Химия, 1979. 256 с.
4. Лопатина А.А., Сазонова С.А. Анализ технологий укладки труб // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура 2016. Т. 7. № 1. С. 93–111.

5. Li Hong (Ed.) *Fiberglass Science and Technology: Chemistry, Characterization, Processing, Modeling, Application, and Sustainability*. Springer, 2021. p.555

6. Альтмайер Г. Напорные трубы для воды, газа и промышленных трубопроводов. Справочник по пластмассовым трубам / Л.: Химия, 1985. 248 с.

7. Ромейко В.С. Трубы и ускорение развития экономики. М.: Экономика, 1989. 150 с.

8. Мельников Д.А., Иванов С.В., Антошин В.А. Стеклокомпозитные трубы и изделия из них: заданное сочетание эксплуатационных и технологических свойств // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2020. № 6. С. 22–23.

9. Raymond L. Sterling. Developments and research directions in pipe jacking and microtunneling // *Underground Space*, 2020, Vol. 5, Issue 1. pp. 1–19.

10. ГОСТ Р 55877-2013. Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Методы испытаний. Определение износостойкости внутренней поверхности.

11. ТУ 22.21.21-003-99675234-2019 (взамен ТУ 2296-003-99675234-2007). Трубы, муфты, фасонные и соединительные детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном, изготовленные по технологии «НТТ», для питьевого водоснабжения. Технические условия. Дата введения 01.07.2019 г.

12. Албагачиев А. Ю. Патент на полезную модель. Российская Федерация, МПК G01N19/02 / Машина для измерения трибометрических параметров материалов. // А.Ю. Албагачиев, А.Г. Абакумкин., Ю.В. Баранов, В.Н. Хованский., Н.П. Хованская. Заявитель и патентообладатель: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (RU) - 2011138337/28; заявл.20.09.2011115919. опубл. 20.09.2011.

REFERENCES

1. Bjerklund I. Plastic pipes, their characteristics and applications. Moscow: NPG, 2000, 116 p.
2. Li Hong (Ed.) *Fiberglass Science and Technology: Chemistry, Characterization, Processing, Modeling, Application, and Sustainability*. Springer, 2021. 555 p.
3. Aslanova M.S., Kolesov Yu.I., Khazanov V.E., Khodakovskiy M.D., Sheiko V.E. Glass fibers. Moscow: Chemistry, 1979, 256 p.

4. Lopatina A.A., Sazonova S.A. Analysis of pipe-laying technologies / Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture. Vol. 7, 2016, no. 1. pp. 93–111.

5. Li Hong (Ed.) Fiberglass Science and Technology: Chemistry, Characterization, Processing, Modeling, Application, and Sustainability. Springer, 2021. p.555

6. Altmaier G. Pressure pipes for water, gas and industrial pipelines. Handbook of plastic pipes / Leningrad: Khimiya, 1985, 248 p.

7. Romeyko V.S. Pipes and acceleration in the development of the economy. Moscow: Ekonomika, 1989, 150 p.

8. Melnikov D.A., Ivanov S.V., Antoshin V.A. Fiber-glass composite pipes and products made of them: a given combination of serviceability and processing behavior/ The best accessible water supply and water discharge technologies, 2020, no. 6, pp. 22–23.

9. Raymond L. Sterling. Developments and research directions in pipe jacking and microtunneling // Underground Space, 2020, Vol. 5, Issue 1. pp. 1–19.

10. State standard R 55877-2013. Pipes and pipeline parts made of reactoplasts, glass-reinforced. Testing techniques. Inner surface wearing test.

11. TS 22.21.21-003-99675234-2019 (supersede TS 2296-003-99675234-2007). Pipes, couplings, shaped pieces and fittings of pipelines made of reactoplasts, glass-reinforced, manufactured according to «NTT» technology for portable water supply. Technical standards. Date of introduction 01.07.2019

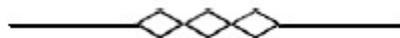
12. Albagachiev A. Yu. Patent for a utility model. Russian Federation, IPC G01N 19/02 / Machine for measuring tribometric parameters of materials. // A.Yu. Albagachiev, A.G. Abakumkin., Yu.V. Baranov, V.N. Khovansky., N.P. Khovanskaya. Applicant and patent holder: IMS RAS named after A.A. Blagonravov (RU) - 2011138337/28; application 20.09.201115919. publ. 09/20/2011.

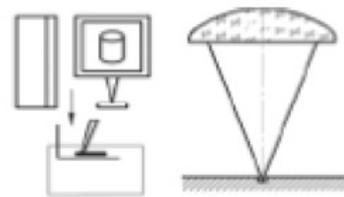
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 23.03.2023; одобрена после рецензирования 03.04.2023; принята к публикации 17.04.2023

The article was submitted 23.03.2023; approved after reviewing 03.04.2023; accepted for publication 17.04.2023





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 38-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 38-48.

Научная статья
УДК 621.7.015
doi: 10.30987/2223-4608-2023-38-48

Влияние технологических параметров вибрационной обработки на качество изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления

Евгений Петрович Злобин¹, магистрант
Александр Исаакович Хаймович², д.т.н.
Евгений Станиславович Гончаров³, аспирант
Андрей Владимирович Балякин⁴, старший преподаватель
^{1, 2, 3, 4} Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара, Россия
¹ ep.smr@mail.ru, <https://orcid.org/000-0001-8419-7653>
² berill_samara@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9935-5703>
³ zekangon@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2250-2613>
⁴ balaykinav@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1558-1034>

Аннотация. Представленные в данной статье результаты исследования посвящены изучению влияния режимов вибрационной обработки на поверхностный слой плоских образцов из титанового сплава ВТ-6, полученных при помощи технологии селективного лазерного сплавления (СЛС). Титановые сплавы являются материалами, которые используются в различных областях промышленности благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность и легкость. Однако, при обработке таких материалов возникает ряд проблем, связанных с высокой твердостью и сложностью постобработки изделий после выращивания. Операции постобработки нуждаются в автоматизации для сокращения различных видов затрат. Вибрационная обработка является одним из возможных решений этой задачи. В рамках данного исследования были проведены измерения шероховатости образцов и вычислены величины съема материала в зависимости от параметров вибрационной обработки. Результаты показали, что черновое шлифование плоских поверхностей в виброгалтовочном оборудовании является эффективным методом для достижения требуемых параметров поверхности при обработке изделий из титановых сплавов, полученных методом СЛС. Это может привести к улучшению качества обработки, повышению продуктивности и снижению затрат на производство. Проведенный анализ результатов позволяет составить рекомендации для чернового шлифования поверхностей из титановых сплавов. Процесс необходимо проводить в два этапа: на первом – провести максимальный съем материала с поверхности, на втором – улучшить шероховатость. Таким образом, результаты исследования могут быть полезны для различных промышленных секторов, где используются титановые сплавы, и способствовать дальнейшему развитию технологий обработки изделий из труднообрабатываемых материалов, полученных с помощью технологии СЛС.

Ключевые слова: постобработка, вибрационная обработка, галтовка, поверхностный слой, шероховатость, селективное лазерное сплавление, аддитивные технологии

Благодарности: Работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Организация высокотехнологичного производства индустриальных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» (Соглашение о предоставлении гранта № 075-11-2021-042 от 24.06.2021 г.).

Для цитирования: Злобин Е.П., Хаймович А.И., Гончаров Е.С., Балякин А.В. Влияние технологических параметров вибрационной обработки на качество изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-38-48

The effect of vibration treatment technological parameters on the quality of products, manufactured by using selective laser fusion technology

Evgeny P. Zlobin¹, Master's student
Alexander I. Khaimovich², D. Eng.
Evgeny S. Goncharov³, PhD student
Andrey V. Balyakin⁴, Senior Lecturer

^{1, 2, 3, 4} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev,
Samara, Russia

¹ ep.smr@mail.ru

² berill_samara@bk.ru

³ zekangon@gmail.com

⁴ balaykinav@ssau.ru

Abstract. The research results presented in this article are devoted to the study of the vibration treatment effect on the surface layer of flat samples made of titanium alloy VT-6 obtained using selective laser melting (SLM) technology. Titanium alloys are the materials, used in various fields of industry due to their unique properties, namely high strength and lightness. However, when treating such materials, there is a number of problems connected with the high hardness and complexity of post-processing products after their growing. Post-processing operations require automation for driving down various types of costs. Vibration treatment is one of the possible solutions to this problem. Within studies a sample roughness was measured and the material removal rate was calculated based on the vibration treatment criteria. The results showed that rough grinding of flat surfaces into vibrofinishing equipment is an effective method for achieving the required surface parameters when treating products made of titanium alloys obtained by the SLM method. This can result in improved finish, increased productivity and costs saving. The analysis of the results makes it possible to give recommendations for rough grinding of surfaces made of titanium alloys. The process must be carried out in two stages: 1) to have maximum material removal from the surface 2) to improve the roughness. Thus, the results of the study can be helpful for various industrial sectors where titanium alloys are used, also contributing to the further development of technologies for products treatment made from difficult-to-machine materials and obtained by using SLM technology.

Keywords: post-processing, vibration treatment, barrel finishing, surface layer, roughness, selective laser melting, additive technologies

Acknowledgements: The works were carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia as part of the implementation of a comprehensive project to create a high-tech production on the topic: "Organization of high-tech production of industrial gas turbine engines with an intelligent system of design and technological preparation to improve functional characteristics" (Grant Agreement No. 075-11-2021-042 dated 06/24/2021)

For citation: Zlobin E.P., Khaimovich A.I., Goncharov E.S., Balyakin A.V. The effect of vibration treatment technological parameters on the quality of products, manufactured by using selective laser fusion technology / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-38-48

Введение

Аддитивные технологии являются перспективной и активно развивающимися технологиями, которые все чаще встречаются в производстве. На данный момент отрасль насчитывает более 15 видов технологий 3D-печати, по которым производятся детали из различных материалов [1]. Из плюсов данных технологий стоит выделить: сокращение рабочего процесса и значительное уменьшение производственных отходов, вариативность форм, получаемых изделий, изготовление деталей

высокой сложности, улучшенные механические свойства и др. [2]. Но также есть и минусы: высокая стоимость, ограниченность в материале, возникновение внутренних напряжений, ограниченность в размерах. Качество поверхности, полученное после изготовления, является еще одним недостатком аддитивных технологий. Зачастую таким методом нельзя получить уже готовую деталь, т. к. точность не всегда будет соответствовать конструкторским требованиям, поэтому существует потребность в постобработке таких изделий.

Постобработка – это процесс или последовательность операций, которые необходимо совершить с изделием после его изготовления с помощью аддитивных технологий для получения требуемых характеристик [3]. Постобработка может занимать до 70 % времени, затраченного на весь процесс аддитивного производства изделия. Объясняется это тем, что почти все этапы постобработки изделия производятся вручную, являются трудоемкими и длительными процессами.

Ручная постобработка имеет свои ограничения: низкая производительность, трудность в прогнозировании времени обработки, невозможность обработки сложных элементов изделия. Именно эти ограничения являются основной проблемой использования аддитивных технологий в среднесерийном и крупносерийном производстве.

В последнее время появляется все больше технологий и установок для замены ручной постобработки на автоматическую [4].

В данной статье речь пойдет об одном из методов улучшения шероховатости изделий после 3D-печати, а именно, галтовании, который может использоваться при изготовлении средней и крупной серии изделий [5]. Можно выделить четыре основных вида галтовочного оборудования: галтовочные барабаны; виброгалтовки; роторное галтовочное оборудование; «буксирные» галтовки.

Галтование активно применяется в машиностроении для осуществления безразмерной финишной обработки изделий. Благодаря этой технологии возможно удаление облоя, заусенцев, ржавчины, окалины, скругление острых кромок, улучшение качества поверхности и снижение шероховатости. В качестве рабочего инструмента при галтовании используют свободные абразивы, которые изготавливаются из разного рода материалов и имеют различную форму. На рис. 1 показаны основные виды галтовочных абразивов в зависимости от состава, формы, размеров и свойств.

Основные виды галтовочных тел

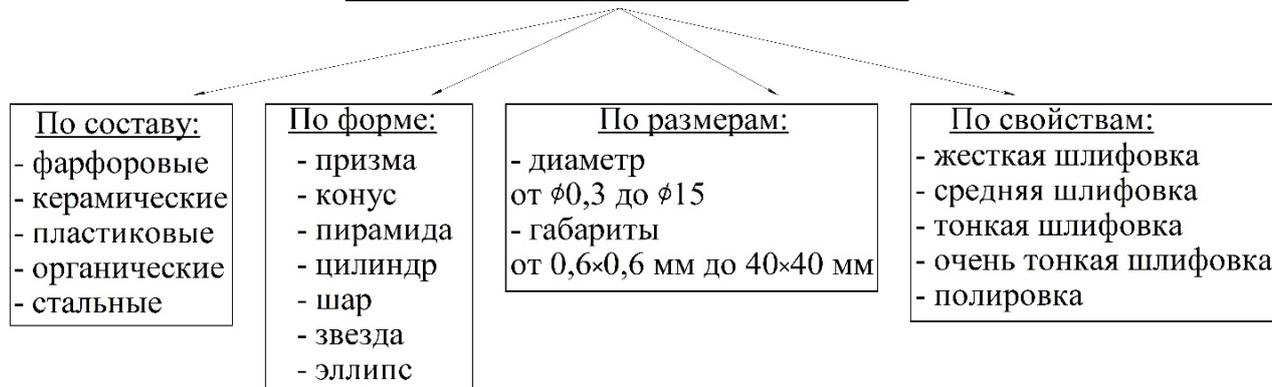


Рис. 1. Основные виды галтовочных тел

В качестве исследуемого оборудования в данной работе рассматривалась виброгалтовочная машина, как один из наиболее популярных типов галтовочного оборудования. При вибрационной обработке поверхность изделия подвергается многочисленным микроударам абразивного материала под действием вибраций, создаваемых рабочей камерой. Металл удаляется в результате механического или химико-механического диспергирования мельчайших частиц металла с обработанной поверхности абразивными телами [6].

Абразивная обработка сопровождается выделением тепла. Средняя температура в рабочей камере не более 40 °С. Динамическое

воздействие галтовочных тел возрастает с увеличением глубины погружения изделия и зависит от расстояния от изделия до стенок камеры, колебательных параметров, размеров и плотности тел. Поэтому в одной партии деталей, обрабатываемых вместе, съем металла может быть неравномерным, а характеристики поверхности могут различаться.

При вибрационной обработке поверхностный слой формируется за счет многочисленных микроударов абразива. Следовательно, качество и физико-механические свойства поверхностного слоя, такие как шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения и структура могут изменяться [7].

Целью данной работы является изучение и подбор рациональных режимов вибрационной обработки, а именно, частоты колебаний рабочей камеры, длительности обработки, интенсивности подачи вспомогательной жидкости и вида абразива для черновой шлифовки заготовок, полученных технологией селективного лазерного сплавления (СЛС) из титанового сплава ВТ6.

Описание эксперимента

Для проведения исследования использовалась галтовочная вибромашина AVALON WR60 mini, предназначенная для массовой (до 5...10 кг) шлифовки и полировки различных деталей (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид галтовочной вибромашины

Данная машина позволяет удалять заусенцы, затупить и округлить кромки, шлифовать, обезжировать, чистить, удалять накипь, ржавчину, нагар, матировать и полировать. Имеется возможность обработки: пластиковыми, керамическими, фарфоровыми наполнителями.

Объектом исследования стали плоские прямоугольные образцы размером $65 \times 8 \times 2$ мм в количестве восьми штук, изготовленные методом СЛС из сферичного титанового порошка ВТ6, часть из которых сплавлялась под углом 0° , а часть под углом 45° [8]. Образцы закреплялись в специальном приспособлении, в котором фиксировалась одна половина и не подвергалась воздействию галтовочных тел, для возможности проведения двух обработок на

одном образце (рис. 3). При таком закреплении процесс обработки крайней части образца не изменится по сравнению с обработкой без данного приспособления. Но в средней части появляется труднодоступное место для воздействия абразивных тел, что негативно сказывается на процесс шлифовки. Протяженности образца достаточно, чтобы измерить его шероховатость, не затрагивая недообработанную зону, поэтому закрепление в приспособлении окажет незначительное влияние на результат.



Рис. 3. Закрепленный образец в приспособлении

В качестве абразива были выбраны пластиковые галтовочные тела от компании Avalon, которые предназначены для грубой шлифовки изделий из цветных сплавов и стали. Исследования проводились с двумя видами тел: конус и пирамида размерами 10×10 мм (рис. 4).



Рис. 4. Галтовочные тела, выбранные для эксперимента

В качестве вспомогательной жидкости использовался компаунд V6 – химическая добавка с концентрацией ионов водорода pH 4,7, которая предназначена для удаления заусенцев, шлифовки и полировки сталей и цветных металлов. Рабочий раствор представляет собой смесь компаунда и воды в соотношении 2:100.

Для процесса галтования возможно изменение следующих параметров обработки: частота обработки (от 1050 до 1950 об/мин); интенсивность подачи вспомогательной

жидкости (от 0 до 100 %); время обработки (от 2 до 8 ч). Исходя из этого, был составлен план эксперимента, отображенный в табл. 1,

который включал в себя 16 обработок на разных режимах с использованием двух видов абразива

1. План эксперимента

№ обработки	№ образца (угол вырачивания)	Вид абразива	Частота обработки, об/мин	Время обработки, ч	Интенсивность подачи компаунда, %
1	1 (0°)	конус	1050	2	0
2	2 (0°)	конус	1350	4	33
3	5 (45°)	конус	1650	6	66
4	6 (45°)	конус	1950	8	100
5	7 (45°)	пирамида	1050	4	66
6	8 (45°)	пирамида	1350	2	100
7	3 (0°)	пирамида	1650	8	0
8	4 (0°)	пирамида	1950	6	33
9	1' (0°)	33 % конус + 66% пирамида	1050	6	100
10	2' (0°)	33 % конус + 66% пирамида	1350	8	66
11	5' (45°)	33 % конус + 66% пирамида	1650	2	33
12	6' (45°)	33 % конус + 66% пирамида	1950	4	0
13	7' (45°)	66 % конус + 33 % пирамида	1050	8	33
14	8' (45°)	66 % конус + 3 % пирамида	1350	6	0
15	3' (0°)	66 % конус + 33 % пирамида	1650	4	100
16	4' (0°)	66 % конус + 33 % пирамида	1950	2	66

До и после обработки проводился замер контролируемых параметров каждого образца, а именно толщины и шероховатости поверхности в соответствии с ГОСТ 2789-73, ГОСТ Р ИСО 4287-2014 и ГОСТ 26877-2008. Для этого использовался кронциркуль Mitutoyo 209-406 и профилометр ИШП-210.

Результаты эксперимента

Данные, полученные в ходе проведения эксперимента, показаны в табл. 2. Проводилось шесть замеров толщины и шероховатости обработанной поверхности и вычислялось среднее значение, которые затем заносилось в табл. 2.

2. Результаты эксперимента

№ обработки	До			После		
	Ra продольная, мкм	Ra поперечная, мкм	Толщина S, мм	Ra продольная, мкм	Ra поперечная, мкм	Толщина S, мм
1	12,0	13,3	2,07	9,1	10,9	2,05
2	13,2	13,7	2,09	9,0	10,6	2,06
3	11,7	11,9	2,07	7,3	7,4	2,01
4	11,4	11,7	2,09	6,5	6,7	2,02
5	11,2	11,3	2,04	8,2	8,3	2,00
6	12,0	12,1	2,08	10,1	9,7	2,05
7	12,2	14,1	2,08	8,4	9,8	2,04
8	12,1	13,0	2,07	7,3	8,3	2,02
9	12,0	13,3	2,07	8,7	10,8	2,04
10	12,9	13,5	2,07	10,3	10,6	2,04
11	10,9	10,9	2,03	8,4	8,5	1,99
12	11,5	11,7	2,03	7,5	7,5	1,99
13	11,0	10,9	2,07	8,7	8,6	2,03
14	12,0	11,9	2,05	8,6	8,4	2,01
15	14,2	15,1	2,10	11,4	12,1	2,05
16	11,5	12,4	2,05	9,6	10,3	2,03

Для удобства анализа результатов, подсчитаем такие величины как изменение шероховатости ($\Delta Ra = Ra_{до} - Ra_{после}$), толщина

съем материала ($\Delta S = S_{до} - S_{после}$), съем материала в единицу времени ($Q = \frac{\Delta S}{t}$) и сведем их в табл. 3.

3. Обработанные результаты эксперимента

Номер обработки (тело/ частота обработки/время/ подача компаунда)	Изменение шероховатости ΔRa , мкм		Толщина съема материала, мм	Время, ч	Съем материала в единицу времени, мм/ч
	Продольная	Поперечная			
1 (конус/1050/2/0)	3,0	2,5	0,02	2	0,008
2 (конус/1350/4/33)	4,2	3,0	0,03	4	0,008
3 (конус/1650/6/66)	4,5	4,5	0,07	6	0,011
4 (конус/1950/8/100)	4,9	5,0	0,07	8	0,008
5 (пирамида/1050/4/66)	3,0	2,9	0,03	4	0,008
6 (пирамида/1350/2/100)	1,9	2,4	0,03	2	0,013
7 (пирамида/1650/8/0)	3,8	4,3	0,04	8	0,006
8 (пирамида/1950/6/33)	4,7	4,7	0,05	6	0,008
9 (конус 33 %-пирамида 66%/1050/6/100)	3,2	2,5	0,03	6	0,005
10 (конус 33 %-пирамида 66%/1350/8/66)	2,6	2,9	0,03	8	0,004
11 (конус 33 %-пирамида 66%/1650/2/33)	2,5	2,4	0,04	2	0,018
12 (конус 33 %-пирамида 66%/1950/4/0)	3,9	4,2	0,05	4	0,012
13 (конус 66 %-пирамида 33%/1050/8/33)	2,3	2,3	0,04	8	0,005
14 (конус 66 %-пирамида 33%/1350/6/0)	3,4	3,4	0,04	6	0,006
15 (конус 66 %-пирамида 33%/1650/4/100)	2,7	3,0	0,05	4	0,013
16 (конус 66 %-пирамида 33%/1950/2/66)	1,9	2,2	0,03	2	0,013

Наилучшие показатели были получены при обработке на следующих режимах: вид галтовочного тела – конус; частота обработки – 1950 об/мин; время – 8 ч; подача компаунда – 100 %, что видно из табл. 3. Но на данных режимах расход компаунда и электроэнергии будет максимальным, а обработка займет длительное время, поэтому необходимо провести анализ изменения каждого параметра, определить их влияние и понять, какие из них можно уменьшить для повышения экономичности обработки.

Анализ результатов

С помощью программы Statistica был проведен статистический анализ полученных результатов, определена зависимость

шероховатости и съема материала от изменяемых параметров. Для этого была выполнена оценка корреляционных зависимостей выходных данных, оценка степени влияния категориальных факторов, а также оценка взаимного влияния групп факторов на отклики в плоскости двух факторов.

Оценка корреляционных зависимостей выходных параметров

Коэффициент корреляции Пирсона r представляет собой меру линейной зависимости двух переменных. Предполагается, что две рассматриваемые переменные измерены, по крайней мере, в интервальной шкале, которая, в частности, используется в методе робастного планирования по Тагучи. Если r возвести его в

квадрат, то полученное значение коэффициента детерминации r^2 представляет долю вариации, общую для двух переменных. Чтобы оценить зависимость между переменными, нужно знать, как «величину» корреляции, так и ее значимость. Уровень значимости, вычисленный для каждой корреляции, представляет собой главный источник информации о надежности корреляции. Критерий значимости

основывается на предположении, что распределение остатков для зависимых переменных ΔRa и «Съем материала» является нормальным с постоянной (своей) дисперсией для всех значений каждого независимого фактора.

Матрица коэффициентов корреляции Пирсона для данного исследования, показана в табл. 4.

4. Матрица коэффициентов корреляции Пирсона

Параметр	ΔRa продольная	ΔRa поперечная	Съем материала в единицу времени
Вид абразива	-0,584418	-0,449720	0,076188
Обороты в мин	0,396015	0,603172	0,429657
Время экспозиции, час	0,458019	0,513072	-0,742701
Интенсивность подачи компаунда	-0,166151	-0,142489	0,151857
Угол выращивания	0,022870	0,135745	0,295524
ΔRa продольная	1,000000	0,900536	-0,263535
ΔRa поперечная	0,900536	1,000000	-0,161475
Съем материала в единицу времени	-0,263535	-0,161475	1,000000

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Между откликами « ΔRa продольная» и « ΔRa поперечная» существует устойчивая корреляционная связь ($r = 0,9$), т. е. эти параметры реагируют на изменчивость факторов статистически одинаково.

2. Влияние вида абразива является значимым для « ΔRa продольная» и существенным для « ΔRa поперечная» с $r = -0,58$ и $r = -0,45$ соответственно.

3. Наибольшее влияние на « ΔRa поперечная» оказывает фактор «Обороты» с $r = 0,6$ и «Время экспозиции» с $r = 0,51$. Следует отметить, что увеличение этих факторов приводит к уменьшению изменения шероховатости, что, скорее всего, связано с увеличенным временем обработки. Остальные факторы не оказывают существенное влияние на значение этого отклика.

4. Поскольку между « ΔRa поперечная» и « ΔRa продольная» существует устойчивая линейная зависимость, влияние вышеперечисленных факторов на « ΔRa продольная» сказывается аналогичным образом.

5. Фактор «Угол выращивания», исходя из корреляционного анализа, не является статистически значимым и его влияние на шероховатость минимально. Для подтверждения

этого вывода следует прибегнуть к непараметрическому тесту сравнения Манна-Уитни двух групп экспериментов (с углом построения – 0° и 45°).

6. Наибольшее влияние на отклик «Съем материала» оказывает фактор «Время экспозиции» с $r = -0,74$ и «Обороты» с $r = 0,43$. Собственно говоря, оба эти фактора отвечают за производительность и выработку процесса. Отрицательный знак корреляции между «Съем материала» и «Время экспозиции» говорит о том, что время обработки явно преувеличено и основной съем материала происходит в первые часы галтования.

7. Для дополнительного анализа совместного влияния наиболее значимых факторов на отклики следует воспользоваться факторным анализом в плоскости двух групповых факторов.

Оценка взаимного влияния групп факторов на отклики в плоскости двух факторов

Для оценки взаимного влияния факторов был использован факторный анализ в плоскости влияния двух главных групповых факторов с использованием метода Главных компонент и вращением факторной системы координат по методу Варимакс (рис. 5).



Рис. 5. Факторный анализ для двух группирующих факторов

Анализ факторного плана показывает, что «Съем материала» зависит только от факторов активных в группирующем факторе 2, т. е. зависит от совместного действия факторов «Время экспозиции» (в существенно большей степени) и «Обороты в минуту». Для откликов шероховатости « ΔRa поперечная» и « ΔRa продольная» главным группирующим фактором будет фактор 1, который выявляет влияние «Вид абразива» (в значительной степени), «Обороты в минуту» и в существенно меньшей степени – «Время экспозиции». Эти выводы хорошо согласуются с результатами корреляционного анализа.

Для анализа влияния главных факторов и определения оптимальных параметров были применены робастные планы Тагучи [9]. Процедура количественной оценки робастности заключается в

вычислении отношения С/Ш (сигнал-шум) и чувствительности при оценке робастности. Факторы шума – это те факторы, которые находятся вне контроля процесса. Итак, цель усилий по улучшению качества заключается в установке наилучших значений управляющих факторов, которые включены в производственный процесс для того, чтобы максимизировать отношение С/Ш. Вывод из предыдущего состоит в том, что цель усилий по совершенствованию качества может рассматриваться как попытка максимизировать отношение сигнал/шум (С/Ш) соответствующего продукта [10].

Для факторов «Изменение шероховатости ΔRa » и «Съем материала» было использована целевая функция «чем больше, тем лучше» (larger the better – LTB). Этот тип соответствует желательным характеристикам, чьи значения должны быть как можно больше.

$$C/Ш = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right). \quad (1)$$

Результаты анализа для отклика «Съем материала» материала приведены в табл. 5 (ожидаемое соотношение С/Ш при оптимальных условиях) и рис. 6, на котором представлена динамика изменения соотношения С/Ш в зависимости от вариации управляющих факторов. На рис. 7 представлены зависимости соотношения С/Ш для отклика « ΔRa поперечная» от вариации управляющих факторов, а в табл. 6 – ожидаемое соотношение С/Ш при оптимальных условиях для этого отклика.

5. Оптимальные значения факторов по Тагучи для отклика «Съем материала»

Фактор	Ожидаемое отношение С/Ш для отклика «Съем материала» при оптимальных условиях (Среднее значение -41,406; Сигма 3,62354)		
	Уровень	Эффект Размер	Планируемая Ошибка
{1} Вид абразива	Конус	0,2802	1,21
{2} Обороты в минутах	1650	2,2708	1,21
{3} Время экспозиции, ч	2	3,4351	1,21
{4} Интенсивность подачи компаунда	100	0,8712	1,21
Ожидаемое С/Ш		-34,5482	

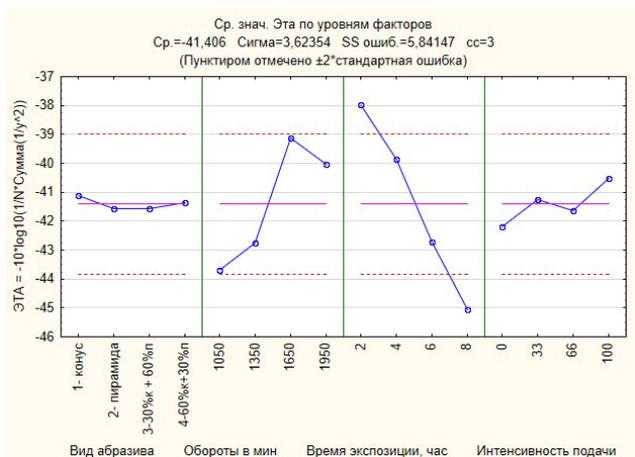


Рис. 6. Зависимость изменения соотношения С/Ш для отклика «Съем материала» от вариации управляющих факторов

Дисперсионный анализ уровней ЭТА (анализ дерева событий) (см. табл. 6) показывает, что наибольшее влияние на отклик «Съем материала» оказывают факторы «Время экспозиции» и «Обороты в минуту». Этот вывод хорошо согласуется с результатами факторного и корреляционного анализов. Фактор «Время экспозиции» оказывает доминирующее влияние на отклик «Съем материала» с относительно высоким уровнем достоверности по отношению к остальным факторам. Интенсивность подачи компаунда фактически не влияет на результат. Наибольший съем материала обеспечивается при 1650 об./мин в течение двух часов при незначительном влиянии остальных факторов (рис. 7).

6. Оптимальные значения факторов по Тагути для отклика «Изменение шероховатости ΔRa »

Фактор	Ожидаемое отношение С/Ш для отклика ΔRa при оптимальных условиях (Среднее значение 4,78840; Сигма 2,50569)		
	Уровень фактора	Эффект Размер	Планируемая Ошибка
{1} Вид абразива	Конус	1,70185	0,422584
{2} Обороты в минутах	1950	1,48269	0,422584
{3} Время экспозиции, час	6	1,63111	0,422584
{4} Интенсивность подачи компаунда	0	1,00542	0,422584
Ожидаемое С/Ш		10,60948	

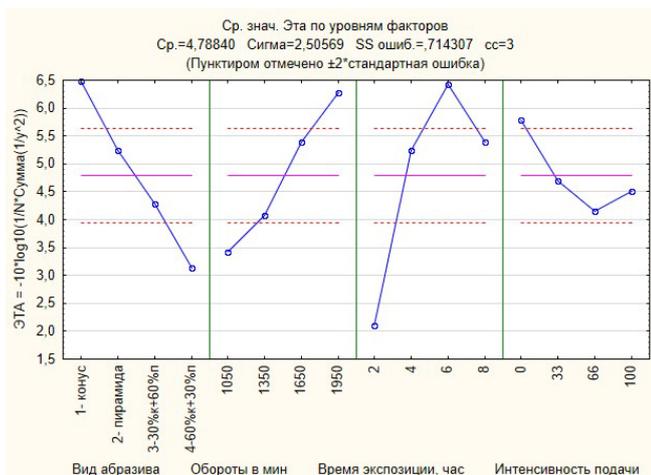


Рис. 7. Зависимость изменения соотношения С/Ш для отклика «Изменение шероховатости ΔRa » от вариации управляющих факторов

оказывают факторы «Время экспозиции» и «Вид абразива». Фактор «Обороты в минуту» менее значим. Интенсивность подачи компаунда фактически не влияет на результат. Кроме того, степень достоверности оценки влияния этого фактора крайне низкая – вероятность ошибки составляет более 21 %

Наилучший результат по уменьшению шероховатости материала обеспечивается при 1950 об./мин в течение шести часов с применением абразивного наполнителя типа «конус» при незначимом влиянии фактора «Интенсивность подачи компаунда» (см. табл. 6 и рис. 7). После шести часов обработки шероховатость резко ухудшается. По-видимому, этот процесс связан с началом абразивной эрозии обрабатываемой поверхности.

Основываясь на проведенном анализе, учитывая оптимальные значения факторов и

Дисперсионный анализ уровней ЭТА (см. табл. 6) показывает, что наибольшее влияние на отклик «Изменение шероховатости ΔRa »

размерный эффект каждого из них, можно подобрать параметры для наиболее экономичного и эффективного черного шлифования

плоских поверхностей, которые показаны в табл. 7.

7. Рекомендуемые технологические режимы виброгалтовки

Фактор	Уровень	Эффект фактора
1 этап		
{1} Вид абразива	Конус	существенный
{2} Обороты в минутах	1650	существенный
{3} Время экспозиции, ч	2	существенный
{4} Интенсивность подачи компаунда	100	несущественный
2 этап		
{1} Вид абразива	Конус	существенный
{2} Обороты в минутах	1950	существенный
{3} Время экспозиции, ч	3...4	существенный
{4} Интенсивность подачи компаунда	0...20	несущественный

Выводы по результатам исследования

После подробного анализа результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Вибрационное галтование является эффективным методом черного шлифования для улучшения качества поверхностного слоя изделий, полученных технологией СЛС.

2. Во время обработки происходит равнозначное изменение продольной и поперечной шероховатости.

3. Наибольшее влияние на изменение шероховатости и съем материала оказывают два фактора: частота и время обработки.

4. Влияние угла выращивания изделий на обработку поверхности минимально и в последующих экспериментах данным фактором можно пренебречь.

5. Наиболее интенсивный съем материала происходит в первые два часа обработки.

6. Подача компаунда во время обработки оказывает положительное влияние на её эффективность, но процентная величина подачи не показала значимого эффекта.

7. Черновую обработку плоских поверхностей рекомендовано проводить в два этапа на следующих режимах:

1 этап: вид абразива – конус; частота обработки – 1650 об./мин; время экспозиции – 2 ч; интенсивность подачи компаунда – 100 %;

2 этап: вид абразива – конус; частота обработки – 1950 об./мин; время экспозиции – 4 ч; интенсивность подачи компаунда – 20 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения (Переиздание). Введ. 2017-12-01. М.: Стандартинформ, 2020.
- Чемодуров А. Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 210–217. EDN WLXVCZ.
- W. Piedra-Cascón, V. R. Krishnamurthy, W. Att, M. Revilla-León. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review // Journal of Dentistry. 2021. Vol. 107. – P. 103630. DOI 10.1016/j.jdent.2021.103630. EDN ISRCTC.
- Бабичев А.П., Зеленцов Л.К., Самодумский Ю.М. Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей. Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1981. 160 с.
- Ющенко А. В., Флек М. Б. Исследование процесса съёма металла при абразивной галтовке // Вестник Донского государственного технического университета. 2013. Т. 13, № 3-4(72-73). С. 125–133. EDN RFUKBL.
- Tarasovskii V. P. Surface Machining of Corundum-Ceramic Components by Free Abrasive // Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40. No 9. P. 793–796. DOI 10.3103/S1068798X20090191. EDN NGRCFV.
- Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д, 1999. 621 с.
- Назарова Т. И. Микроструктура и механические свойства на растяжение сплава ВТ6, полученного методом селективного лазерного плавления / Т. И. Назарова, В. М. Имаев, Р. М. Имаев, С. П. Павлинич // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 6. С. 25–29. EDN UBXJDD.
- Paо С. Методы Тагути: эволюция, концепция и межотраслевое применение / С. Рао, П. Самант, А.

Кадампатта, Р. Шеной // Методы менеджмента качества. 2016. № 6. С. 50–57. EDN VZYDFL.

10. Ramón V. León, Anne C. Shoemaker & Raghu N. Kacker (1987) Performance Measures Independent of Adjustment: An Explanation and Extension of Taguchi's Signal-to-Noise Ratios, *Technometrics*, 29:3, 253–265, DOI: 10.1080/00401706.1987.10488231

REFERENCES

1. State Standard R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Additive manufacturing processes. Basic principles. Part 1. Terms and definitions (Reissue). Introduction. 2017-12-01. Moscow: Standartinform, 2020.

2. Chemodurov A. N. Application of additive technologies in the production of mechanical engineering products // *Proceedings of the Tula State University. Technical sciences*. 2016, no. 8-2. pp. 210–217. EDN WLXVCZ.

3. W. Piedra-Cascón, V. R. Krishnamurthy, W. Att, M. Revilla-León. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review // *Journal of Dentistry*. 2021. Vol. 107. P. 103630. DOI 10.1016/j.jdent.2021.103630. EDN ISRCTC.

4. Babichev A.P., Zelentsov L.K., Samodumsky Yu.M. Design and operation of vibrating

machines for parts treatment. Rostov: Publishing House of the Rostov University, 1981, 160 p.

5. Yushchenko A.V., Fleck M. B. Investigation of the process of metal removal with abrasive barrelling // *Bulletin of the Don State Technical University*, 2013, vol. 13, no. 3-4(72-73), pp. 125–133. EDN RFUKBL.

6. Tarasovskii V. P. Surface Machining of Corundum-Ceramic Components by Free Abrasive // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40. No 9. P. 793–796. DOI 10.3103/S1068798X20090191. EDN NGRCFV.

7. Babichev A.P., Babichev I.A. Fundamentals of vibration technology. Rostov-na-Donu, 1999, 621 p.

8. Nazarova T. I. Microstructure and mechanical tensile properties of VT6 alloy obtained by selective laser melting / T. I. Nazarova, V. M. Imaev, R. M. Imaev, S. P. Pavlinich // *Izvestiya vuzov. Physics*. 2015, vol. 58, no. 6, pp. 25–29. EDN UBXJDD.

9. Rao S. Taguchi methods: evolution, concept and intersectoral application / S. Rao, P. Samand, A. Kadampatta, R. Shennoy. *Methods of quality management*, 2016, no. 6, pp. 50–57. EDN VZYDFL.

10. Ramón V. León, Anne C. Shoemaker & Raghu N. Kacker (1987) Performance Measures Independent of Adjustment: An Explanation and Extension of Taguchi's Signal-to-Noise Ratios, *Technometrics*, 29:3, 253–265, DOI: 10.1080/00401706.1987.10488231

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 17.03.2023; одобрена после рецензирования 24.03.2023; принята к публикации 11.04.2023

The article was submitted 17.03.2023; approved after reviewing 24.03.2023; assepted for publication 11.04.2023

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

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

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

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

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

Сдано в набор 17.06.2023. Выход в свет 30.06.2023.

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