

### 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, Украина)

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. ШОЕВ 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

Гусев В.Г. Волнистость плоских поверхностей, шлифованных  
периферией комбинированного инструмента . . . . . 3

Воробьев А.А., Крутько А.А., Седых Д.А. Разработка модели для оценки  
напряженно-деформированного состояния твердосплавного инструмента  
при восстановительной обработке железнодорожных колес. . . . . 9

Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Звоновских В.В. Ленточное глубинное  
шлифование – прогрессивный вид механической обработки. . . . . 16

Унянин А.Н., Чуднов А.В. Исследование параметров процесса при  
обработке фрезами с различным шагом между зубьями . . . . . 21

Губанова А.А. Методика изучения вибрационных процессов при  
фрезеровании. . . . . 27

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

Сундуков С.К. Применение ультразвуковых технологий при получении  
заклёпочных соединений. . . . . 33

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕМОНТЕ, ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Соловьев М.Е, Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И. Расчет  
рационального гранулометрического состава композиций для  
газотермического нанесения порошковых покрытий . . . . . 38

Указатель статей за 2022 г. . . . . 44

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

**№ 12 (138)**

**2022**

**Publishes from July 2011**

**MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL**

**Comes out with assistance of Engineering Technologists Association**

## **Editor-in-chief**

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

## **Deputy chief editor**

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

## **Chairman of Editorial Committee**

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

## **Chairman Assistant**

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

## **Editorial Committee:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

d.en.s., Acad. RAS LYSAK V.I. (Volgograd)

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

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

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

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. TCHIGIRINSKY Ju.L. (Volgograd)

c.en.s., assoc. prof. SHOEV 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**

- Gusev V.G.** Waviness of flat surfaces grinded by the periphery of the combined tool ..... 3
- Vorobyev A.A., Krutko A.A., Sedykh D.A.** Investigation of the stressed state of a carbide tool during turning of railway wheels ..... 9
- Zubarev Yu. M., Priemyshev A.V., Zvonovskikh V.V.** Abrasive-belt creep feed grinding as a progressive type of machining operation ..... 16
- Unyanin A.N., Chudnov A.V.** Process parameters survey in milling with various tooth cutters ..... 21
- Gubanova A.A.** Methodology for the study of vibration processes in milling operations ..... 27

### **ELECTRO-PHYSICO-CHEMICAL AND COMBINED PROCESSING TECHNOLOGIES**

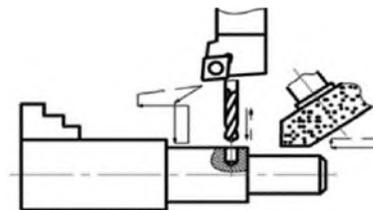
- Sundukov S.K.** Application of ultrasonic technologies in riveted joints manufacturing ..... 33

### **SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN COATING, PARTS REPAIR AND RECOVERY**

- Soloviev M.E., Baldaev S.L., Baldaev L.Kh., Mishchenko V.I.** Site composition calculation for gas-thermal powder coating. .... 38
- Index of articles ..... 44

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. 2022. №12 (138). С. 3-8.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 3-8.

Научная статья  
УДК 62-1/-9  
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-3-8

## Волнистость плоских поверхностей, шлифованных периферией комбинированного инструмента

Владимир Григорьевич Гусев, д.т.н.  
Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир, Россия  
prof\_gusev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Рассмотрена волнистость плоских поверхностей, шлифованных комбинированным инструментом. Установлена её многофакторная экспериментальная модель, на основе которой оперативно назначают режим шлифования, обеспечивающий требуемые значения волнистости.

**Ключевые слова:** шлифование, комбинированный инструмент, волнистость, режим резания, многофакторная модель

**Для цитирования:** Гусев В.Г. Волнистость плоских поверхностей, шлифованных периферией комбинированного инструмента // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 3-8. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-3-8.

Original article

## Waviness of flat surfaces grinded by the periphery of the combined tool

Vladimir G.Gusev  
Stoletovs State University of Vladimir, Vladimir, Russia  
prof\_gusev@mail.ru

**Abstract.** The waviness of flat surfaces plain with a combined tool is considered. Its multifactorial experimental model has been established, on the basis of which a grinding mode is promptly assigned that provides the required waviness values.

**Keywords:** grinding, combined tool, waviness, cutting mode, multi-factor model

**For citation:** Gusev V.G. Waviness of flat surfaces grinded by the periphery of the combined tool. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 3-8. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-3-8.

Волнистость – геометрический показатель качества поверхности детали, определяющий эксплуатационные свойства деталей машин: контактную жёсткость, шум, вибрацию и др. [1]. Формирование макроотклонений и шероховатости поверхностей на операциях механической обработки изучено детально [2]. Вопросы формирования волнистости поверхностей, её прогнозирования исследованы в меньшей степени, что частично связано с отсутствием технических требований к волнистости в рабочих чертежах деталей.

В то же время доказано, что степень влияния волнистости на эксплуатационные свойства деталей достаточно высока [2], в частности, волнистость беговых дорожек колец подшипников является доминирующим фактором, определяющим уровень вибрации работающей подшипниковой опоры.

В результате совершенствования способов механической обработки материалов появляются новые режущие инструменты, например, комбинированные фрезы, зенкеры, шлифовальные круги, которые позволяют повысить

производительность технологических операций. Инструмент для комбинированного шлифования состоит из шлифовальных кругов с различными характеристиками абразивного материала, что позволяет выполнять одновременно предварительную и окончательную обработку заготовок [3].

Крупнозернистый круг располагают между передней опорой шпинделя станка и мелкозернистым кругом, он выполняет предварительную обработку. Мелкозернистый круг выполняет окончательную обработку, он расположен перед крупнозернистым кругом на максимальном расстоянии от передней опоры консольного шпинделя шлифовального станка [3]. Одновременное выполнение предварительного и окончательного шлифования на одном станке без замены крупно- на мелкозернистый круг приводит к уменьшению вспомогательного времени на выполнение технологической операции и повышению производительности процессов обработки [3].

Кроме этого, комбинированные шлифовальные инструменты открывают новые возможности в управлении процессом обработки поверхностей заготовки путем использования дополнительных независимых факторов, отсутствующих в известных процессах шлифования. Так, управлять выходными параметрами процесса комбинированного шлифования можно не только изменением режима резания, характеристики абразивного материала круга, состава смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и способа её подачи, но и различным сочетанием характеристик абразивного материала крупно- и мелкозернистого шлифовальных кругов.

Дополнительными факторами комбинированного шлифования, существенно влияющими на выходные параметры процесса по сравнению с обработкой стандартными кругами, являются также отношение высот мелко- и крупнозернистого кругов [4], величина припуска, снимаемого каждым кругом; размеры и характер расположения текстуры на режущих поверхностях кругов [5]. Сочетание различных

размерных и фазовых характеристик текстур на режущих поверхностях крупно- и мелкозернистого шлифовальных кругов, открывает новые возможности в эффективном управлении температурой обрабатываемой заготовки [6], что позволяет обеспечивать требуемое физико-механическое состояние шлифованного поверхностного слоя изделий.

Использование указанных выше дополнительных факторов управления процессом комбинированного шлифования позволит уменьшить трудовые, финансовые затраты на выполнение технологической операции и повысить геометрические, физико-механические показатели качества обработанного поверхностного слоя изделий.

Для эффективного управления процессом шлифования, обеспечения требуемых показателей качества при минимальных издержках производства необходимы математические модели, связывающие выходные параметры процесса шлифования с независимыми входными факторами. В настоящее время для процессов комбинированного шлифования разработаны модели шероховатости и температуры обработанной поверхности, а для других выходных параметров такие модели пока не установлены.

Целью исследования является определение многофакторной экспериментальной модели волнистости поверхностей, обработанных комбинированным инструментом, на основе которой можно оперативно назначать режим шлифования, обеспечивающий требуемые значения волнистости.

Для достижения поставленной цели реализован полный факторный эксперимент  $N = 2^k = 2^3 = 8$ , где  $k = 3$  – число независимых факторов процесса комбинированного шлифования. Режимы плоского периферийного шлифования комбинированным инструментом заданы значениями верхнего (+) и нижнего (-) уровней независимых факторов (табл. 1): припуска на проход  $t$  (код  $x_1$ ), продольной  $S_{пр}$  ( $x_2$ ), поперечной  $S_{п}$  ( $x_3$ ), подачи заготовки.

**1. Уровни и интервалы варьирования независимых факторов процесса комбинированного шлифования**

Факторы	Припуск на проход $t$ , мм	Продольная подача $S_{пр}$ , м/мин	Поперечная подача $S_{п}$ , мм/2.х.
Код	$x$		
Интервал варьирования	0,005	5	2
Верхний уровень	0,015	14	6
Основной уровень	0,010	9	4
Нижний уровень	0,005	4	2

Шлифовали при скорости резания 35 м/с конструкционную легированную сталь 30ХГСА, 227...230 НВ на плоскошлифовальном станке мод. ЗГ71М, в качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) использовали 5%-ный водный раствор LACTVCA WBA 5400, расход СОЖ –  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с).

Одновременную предварительную и окончательную обработку опытных образцов реализовали соответственно стандартными шлифовальными кругами ПП 250×20×76 мм, 25AF40L8VA и ПП 250×10×76 мм, 25AF90L8VA. Правку крупно- и мелкозернистого шлифовальных кругов проводили алмазным карандашом типа С при следующем режиме: два черновых прохода при глубине реза-

ния  $t_1 = 0,015$  мм, продольной подаче алмазного карандаша  $S_{пр1} = 250$  мм/мин и один чистойвой проход при  $t_2 = 0,005$ ,  $S_{пр2} = 150$  мм/мин. Частота вращения комбинированного шлифовального круга в процессе правки составляла 2880 мин<sup>-1</sup>.

Значения параметра оптимизации  $Y(H\delta)$  обработанной поверхности определяли с использованием профилометра Mitutoyo Formtracer Avant S3000-D. Рандомизацию последовательности проведения опытов во времени, указанную в матрице планирования (табл. 2, столбец «Опыты»), реализовали с использованием компьютерной программы Randstuff.ru/number.

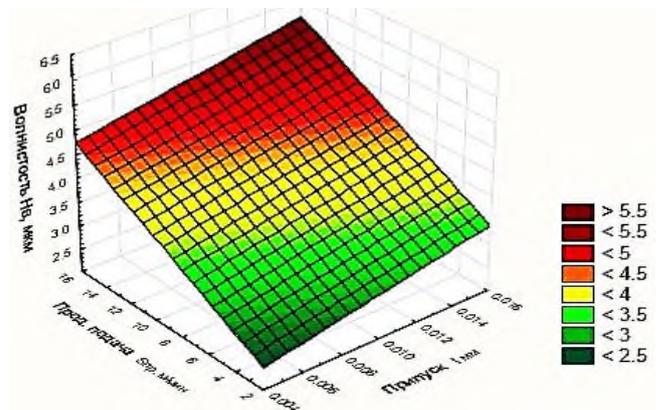
## 2. Матрица планирования и результаты многофакторного эксперимента

Опыты	Независимые факторы				Параметр оптимизации, мкм
					$Y(H\delta)$
6	+	+	+	+	5,9
3	+	–	+	+	5,5
4	+	+	–	+	4,1
7	+	–	–	+	3,7
1	+	+	+	–	4,9
5	+	–	+	–	3,2
2	+	+	–	–	2,9
8	+	–	–	–	2,3

В результате статистической обработки данных полного факторного эксперимента получены уравнения регрессии, связывающие параметр оптимизации одновременно с двумя и тремя факторами. При обработке экспериментальных данных использован функционал, обеспечивающий построение 3М-XYZ поверхность-графиков и 3М-XYZ контур-графиков, на основании которых оперативно определяют значения волнистости обработанной поверхности для конкретных режимов шлифования комбинированным инструментом. Интерактивное влияние снимаемого припуска  $t$  и продольной подачи  $S_{пр}$  заготовки на волнистость поверхности  $H\delta$ , обработанной комбинированным инструментом, описывается уравнением регрессии:

$$H\delta = 1,825 + 77,5t + 0,163S_{пр}. \quad (1)$$

Графическая интерпретация уравнения (1) представлена на рис. 1, где справа от цветовой области поверхности отклика изображен столбец, включающий цветные прямоугольники с числами, отражающими значения волнистости шлифованной комбинированным кругом поверхности.



**Рис. 1. 3М-XYZ поверхность-график интерактивного влияния снимаемого припуска и продольной подачи заготовки на волнистость поверхности, обработанной комбинированным инструментом**

Например, прямоугольнику желтого цвета соответствуют значения волнистости меньше 4 мкм, такие же её значения соответствуют желтой области поверхности отклика, что позволяет оперативно определять элементы режима шлифования, обеспечивающие волнистость менее 4 мкм. Аналогично можно оперативно определять режим шлифования, обеспе-

чивающий значение волнистости, заданное чертёжом детали.

3М-XYZ контур-график интерактивного влияния снимаемого припуска и продольной подачи заготовки на волнистость поверхности, шлифованной комбинированным инструментом (рис. 2), содержит также области, отличающиеся цветом и ограниченные ломаными прямыми линиями, что также ускоряет определение параметра оптимизации для конкретных значений элементов режима резания.

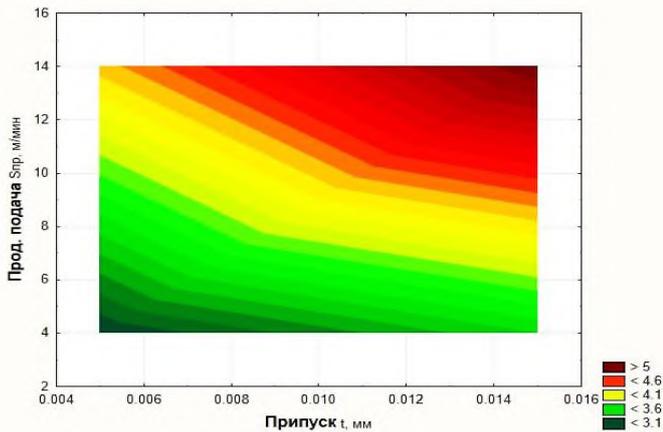


Рис. 2. 3М-XYZ контур-график интерактивного влияния снимаемого припуска и продольной подачи заготовки на волнистость поверхности, обработанной комбинированным инструментом

Интерактивное влияние снимаемого припуска и поперечной подачи заготовки описывается уравнением регрессии:

$$H_B = 1,813 + 77,5t + 0,369S_{пр}. \quad (2)$$

Графическая интерпретация уравнения (2) представлена на рис. 3.

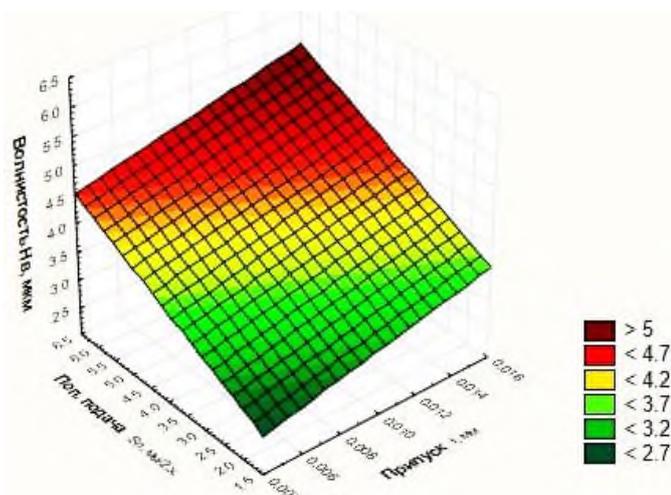


Рис. 3. 3М-XYZ поверхность-график интерактивного влияния снимаемого припуска и поперечной подачи заготовки на волнистость поверхности, обработанной комбинированным инструментом

3М-XYZ контур-график интерактивного влияния снимаемого припуска и поперечной подачи заготовки на волнистость обработанной поверхности представлен на рис. 4.

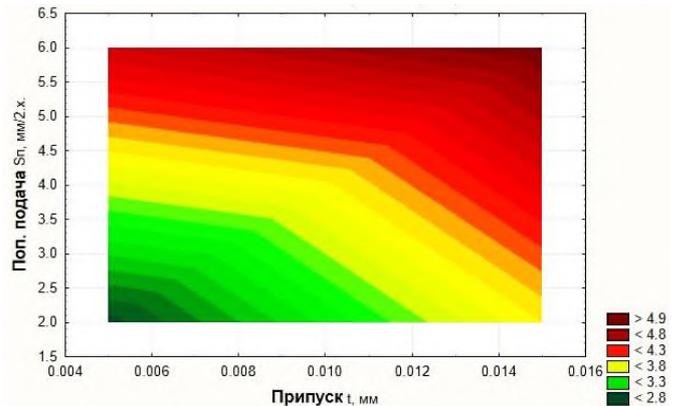


Рис. 4. 3М-XYZ контур-график интерактивного влияния снимаемого припуска и поперечной подачи заготовки на волнистость обработанной поверхности

Интерактивное влияние продольной и поперечной подачи заготовки на волнистость поверхности, обработанной комбинированным шлифовальным инструментом, описывается уравнением регрессии:

$$H_B = 1,125 + 0,163S_{пр} + 0,369S_{п}. \quad (3)$$

Графическая интерпретация уравнения (3) представлена на рис. 5.

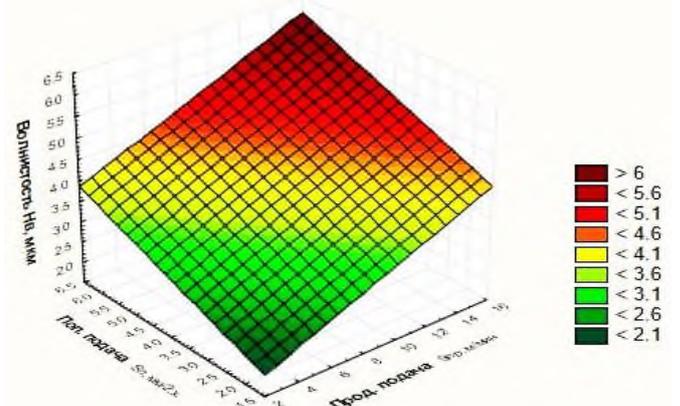


Рис. 5. 3М-XYZ поверхность-график интерактивного влияния продольной и поперечной подачи заготовки на волнистость обработанной поверхности

3М-XYZ контур-график интерактивного влияния продольной и поперечной подачи заготовки на волнистость, представленный на рис. 6, отличается от аналогичных контур-графиков (см. рис. 2, рис. 4) углами наклона прямых, ограничивающих цветовые области поверхности отклика к осям абсцисс и ординат, что вызвано различными коэффициентами, стоящими перед факторами в уравнении регрессии.

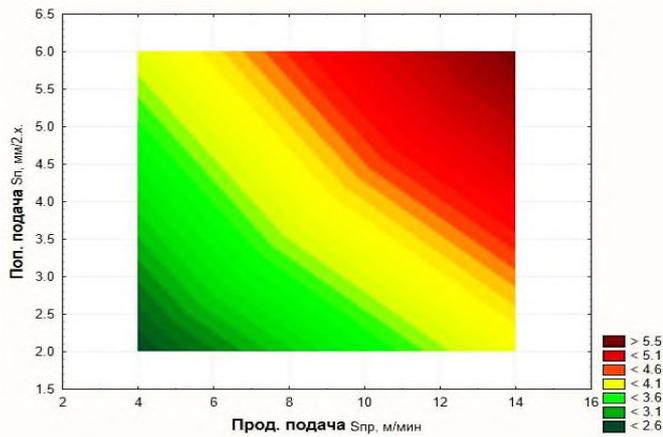


Рис. 6. 3М-XYZ контур-график интерактивного влияния продольной и поперечной подачи заготовки на волнистость обработанной поверхности

Для определения уравнения регрессии, описывающего интерактивное влияние на волнистость поверхности одновременно всех трех независимых факторов, необходимо сначала найти уравнение регрессии в кодовом обозначении факторов, а затем перейти к искомому уравнению регрессии в натуральном их обозначении.

Уравнение регрессии в кодовом обозначении факторов необходимо не только для оценки влияния на параметр оптимизации каждого фактора в отдельности, но и для сравнения факторов между собой по тренду и степени влияния на волнистость.

В результате статистической обработки данных полного факторного эксперимента получено уравнение регрессии в кодовом обозначении всех трех факторов и параметра оптимизации, которое имеет вид:

$$Y = 4,0625 + 0,3875x_1 + 0,8125x_2 + 0,7375x_3, \quad (4)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – кодовые обозначения независимых факторов  $t, S_{пр}$  и  $S_{п}$  соответственно;  $Y$  – кодовое обозначение параметра оптимизации, т.е. волнистости шлифованной поверхности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бишутин, С.Г., Захаров, Л.А. Обеспечение требуемых параметров качества поверхностного слоя плоских поверхностей при обработке абразивными бруска-

Из (4) следует, что все три фактора при их увеличении вызывают повышение волнистости поверхности. Уравнение регрессии в натуральном обозначении припуска на проход, продольной, поперечной подачи и параметра оптимизации имеет вид:

$$H_B = -0,016 + 77,5t + 0,163S_{пр} + 0,369S_{п}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что наибольшее влияние на волнистость поверхности, шлифованной комбинированным инструментом, оказывает продольная подача заготовки, за ней по степени влияния следуют поперечная подача и величина припуска, снимаемого за каждый двойной ход рабочего стола с заготовкой.

Совокупность уравнений регрессии (1) - (5), 3М-XYZ поверхность-графиков, 3М XYZ контур-графиков представляет собой многофакторную экспериментальную модель волнистости поверхности, обработанной комбинированным шлифовальным инструментом. Установленная модель волнистости позволяет управлять входными факторами процесса комбинированного шлифования, с целью получения волнистости поверхности, указанной в рабочем чертеже детали. Для управления волнистостью обработанной поверхности в условиях производства рекомендуется использовать уравнение регрессии (5), поскольку в производстве при настройке режима комбинированного шлифования заготовки на конкретном станке используют абсолютные единицы измерения независимых факторов.

Полученные результаты исследований рекомендуются использовать в условиях машиностроительных и других промышленных предприятий, где проектируют и реализуют технологические процессы шлифования ответственных деталей машин.

ми // Контактная жёсткость. Износостойкость. Технологическое обеспечение: Сб. тр. МНТК. – 2003. – С. 239-242.

2. Витвинов, М.К. Технологическое наследование волнистости на операциях механической обработки на

примере фрезерования и плоского шлифования: Автореф. канд. техн. наук, Барнаул. – 2015. – 18 с.

3. Пат. No 2606143 Российская Федерация. В24D5/14, В24B7/02. Способ шлифования // Гусев В.Г., Морозов А.В.; опубл. 10.01.2017. Бюл. No 1.

4. Гусев, В.Г., Калиновская, Е.В. Влияние соотношения высот кругов в комбинированном инструменте на шероховатость обработанной поверхности // Научно-ёмкие технологии в машиностроении. – 2021. – №5 (119). – С. 14-18.

5. Гусев, В.Г., Калиновская, Е.В. Моделирование температуры обрабатываемой поверхности при комбинированном плоском периферийном шлифовании // Научно-ёмкие технологии в машиностроении. – 2018. – №6 (84). – С. 23-30.

6. Hao Nan Li, Dragos Axinte Textured grinding wheels: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001).

## REFERENCES

1. Bishutin S.G., Zakharov L.A. Obespechenie trebuemykh parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya ploskikh poverkhnostej pri obrabotke abrazivny`mi

bruskami // Kontaktная zhyostkost`. Iznosostojkost`. Tekhnologi-cheskoe obespechenie: Sb. tr. MNTK. 2003. P. 239-242.

2. Bitvinov M.K. Tekhnologicheskoe nasledovanie volnistocti na operacziyah mekhanicheskoy obrabotki na primere frezerovaniya i ploskogo shlifovaniya: Avtoref. ...kand. tekhn. nauk Barnaul, 2015. 18 p.

3. Pat. No 2606143 Rossijskaya Federacziya. В24D5/14, В24B7/02. Sposob shlifovaniya // Gusev V.G., Morozov A.V.; opubl. 10.01.2017. Byul. No 1.

4. Gusev V.G., Kalinovskaya E.V. Vliyanie sootnosheniya vy`sot krugov v kombinirovannom instrumente na sherokhovatost` obrabotannoj poverkhnosti – Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021. No 5 (119). P. 14-18.

5. Gusev V.G., Kalinovskaya E.V. Modelirovanie temperatury` obrabaty`vaemoj poverkhnosti pri kombinirovannom ploskom periferijnom shlifovanii // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2018. No 6 (84). P. 23-30.

6. Hao Nan Li, Dragos Axinte. Textured grinding wheels: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.001)

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

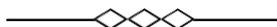
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.08.2022; одобрена после рецензирования 09.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

The article was submitted 12.08.2022; approved after reviewing 09.10.2022; assepted for publication 14.10.2022.



Научная статья

УДК 621.941

doi:10.30987/2223-4608-2022-12-9-15

## Разработка модели для оценки напряженно-деформированного состояния твердосплавного инструмента при восстановительной обработке железнодорожных колес

Александр Алфеевич Воробьев<sup>1</sup>, Д.Т.Н.,  
Андрей Александрович Крутько<sup>2</sup>, К.Т.Н.,  
Дарья Александровна Седых<sup>3</sup>, К.Т.Н.

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения  
императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2,3</sup>Омский государственный технический университет, Омск, Россия

<sup>1</sup>79219751198@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6319-4701>

<sup>2</sup>andrey\_904@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7121-5004>

<sup>3</sup>lebedevada@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5535-0663>

**Аннотация.** Исследовано напряженное состояние твердосплавного режущего инструмента при токарной обработке железнодорожных колес методами математического моделирования и Мичела. На основе термомеханического подхода оценено влияние температур и сил на износ и пластическую деформацию твердого сплава.

**Ключевые слова:** профиль колеса, режущий клин, температура формоустойчивости, касательные напряжения, деформация

**Для цитирования:** Воробьев А.А., Крутько А.А., Седых Д.А. Разработка модели для оценки напряженно-деформированного состояния твердосплавного инструмента при восстановительной обработке железнодорожных колес // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 9-15. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-9-15.

Original article

## Investigation of tense state of carbide instrument at turning treatment of railway wheels

Alexandr A. Vorobyev<sup>1</sup>, Dr.Sc.Tech.,  
Andrey A. Krutko<sup>2</sup>, Can.Sc.Tech.,  
Darya A. Sedykh<sup>3</sup>, Can.Sc.Tech.

<sup>1</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, Russia

<sup>2,3</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>1</sup>79219751198@yandex.ru, <sup>2</sup>andrey\_904@mail.ru, <sup>3</sup>lebedevada@list.ru

**Abstract.** The tense state of carbide instrument at turning treatment of railway wheels work is tested using mathematical modeling and Michel method, taking into account the thermomechanical approach and temperatures and forces effect on wear and plastic deformation of hard alloys.

**Keywords:** wheel profile, cutting wedge, shape stability temperature, tangential stresses, deformation

**For citation:** Vorobyev A. A., Krutko A. A., Sedykh D.A. Investigation of the stressed state of a carbide tool during turning of railway wheels. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 9-15. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-9-15.

### Введение

Эксплуатация железнодорожного транспорта сопровождается износом и повреждением профиля поверхности катания железнодорожных колес при контакте «колесо-рельс». В ремонтных депо производится восстановление профиля преимущественно токарной обработкой с использованием режущего инструмента, оборудованного специальными вставками с закрепленными в них твердосплавными призматическими пластинами ( $r = 4$  мм;  $\varphi = 86^\circ$ ;  $\gamma = 0^\circ$ ;  $\lambda = 6^\circ$ ;  $\alpha = 6^\circ$ ). В качестве основных марок инструментальных материалов используются Т5К10 и Т14К8. Обработка проводится при режимах резания в следующих пределах:  $s = 1,2 \dots 2,12$  мм/об;  $t = 4 \dots 12$  мм;  $v = 50 \dots 65$  м/мин [1 – 4]. В данных условиях инструмент обладает низкой стойкостью и надежностью, что приводит, согласно статистическим данным [5], к значительным простоям оборудования. Снижению стойкости режущего инструмента также способствует увеличение и прочностных характеристик колесной стали (НВ до 3200...3600 МПа).

### Материалы и методы

Обеспечение надежности, стойкости и экономии режущего инструмента возможно за счет выявления и учета факторов, влияющих на процессы, протекающие при резании. В представленной работе произведен анализ факторов, влияющих на процесс изнашивания и деформации режущего инструмента на основе термомеханического подхода и метода Мичела

с учетом условий обработки. Для оценки напряженно-деформированного состояния режущих пластин в данной работе был проведен анализ формы износа, который выявил, что на задней поверхности износа проявляется более интенсивно в области вершины резца. Анализ показал, что неравномерность изменения ширины фаски износа на задней поверхности ( $K_n = \frac{h_B}{h_r}$ ) особенно выражена при повышенных подачах (рис. 1).

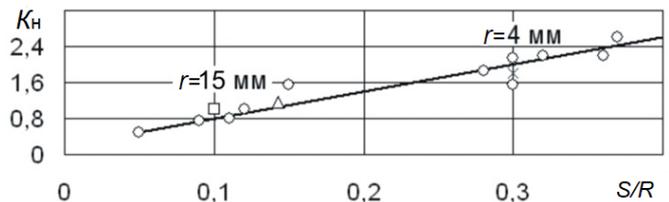


Рис. 1. Зависимость неравномерности износа призматической и чашечной пластин от отношения  $S/R$  при точении профиля колеса (285 НВ)  $s = 1,2 \dots 2,5$  мм/об

В тоже время, применение резцов с большим радиусом закругления вершины ( $r = 15$  мм), например, чашечных, обеспечивало снижение неравномерности износа задней поверхности режущей пластины вплоть до момента наступления катастрофического износа.

Наряду с неравномерным износом задней поверхности режущей пластины, также наблюдается ее интенсивный износ [6], выражающийся в пластической деформации и опускании режущей кромки (рис. 2, а).

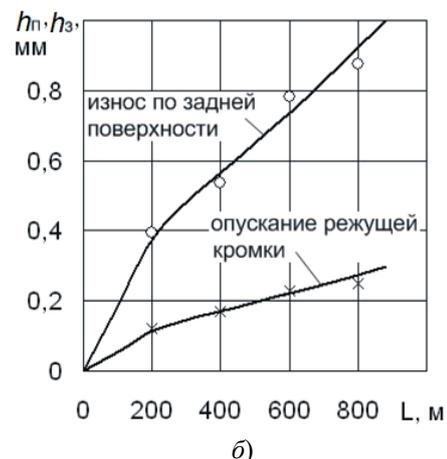
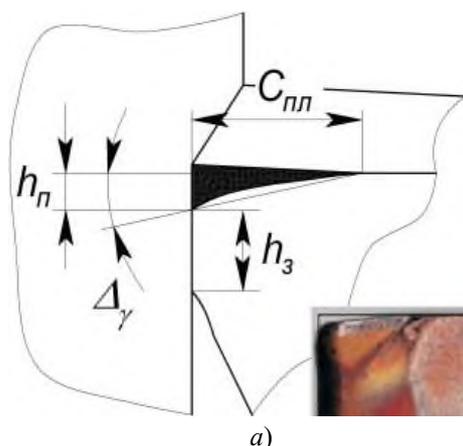


Рис. 2. Форма износа (а) и изменение характеристик изнашивания (б) при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8;  $\varphi = 75^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $r = 4$  мм;  $t = 8$  мм;  $s = 1,2$  мм/об;  $v = 38$  м/мин)

Как показали наблюдения за процессом восстановительной обработки, данная величина пропорциональна значению ширины фаски износа ( $h_3$ ) (см. рис. 2, б). Следовательно, значе-

ние  $h_3$  возможно использовать в качестве одного из критериев износа.

В связи с тем, что процессы изнашивания и ползучести (пластической деформации) зависят

от температуры и напряжения, необходимо обосновать методы их вычисления.

В широко опубликованной литературе [7] для учета влияния условий резания на изнашивание режущего инструмента достаточно часто используется температура резания. Однако, как следует из анализа экспериментальных зависимостей (рис. 3), данная температура не может быть использована в качестве температурного фактора, влияющего на изнашивание, т.к. при изменении интенсивности изнашивания режущего лезвия, изменение температуры находится в пределах погрешности эксперимента.

Таким образом, как следует из рис. 3, температурным фактором, учитывающим зависимость интенсивности изнашивания режущего лезвия от условий обработки, принята температура формоустойчивости (рис. 4).

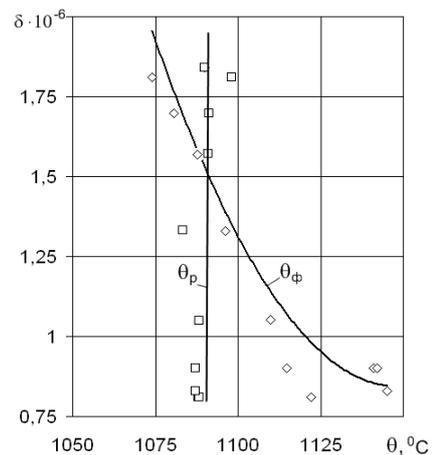


Рис. 3. Влияние температуры на интенсивность изнашивания при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8;  $\varphi = 75^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $r = 4$  мм;  $t = 8$  мм;  $v = 45$  м/мин;  $s = 0,8 \dots 1,2$  мм/об)

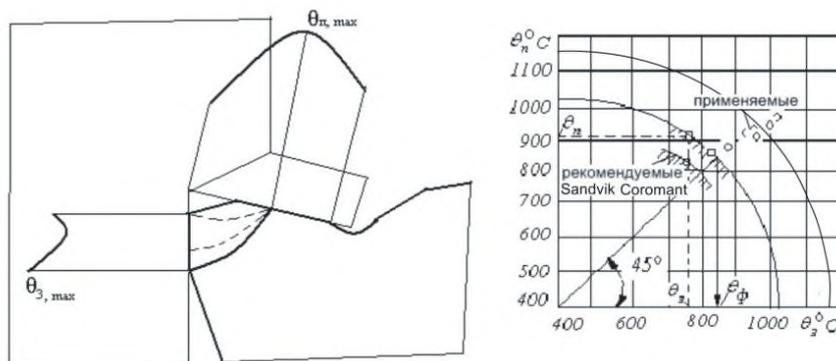


Рис. 4. Определение максимальных температур на поверхностях режущего инструмента при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8;  $\varphi = 75^\circ$ ;  $r = 4$  мм)

Данная температура позволяет обобщить влияние температур, определяемых на передней и задней поверхностях режущего лезвия. Температура формоустойчивости отражает комплексное влияние максимальных температур на передней ( $\theta_{n,max}$ ) и задней ( $\theta_{z,max}$ ) поверхностях режущего лезвия, значения которых определяются с использованием термомеханического подхода [8]. Кроме того, используется условие равенства этих температур, т.е. при  $\theta_0 = 400$  °С:

$$\theta_\phi = \sqrt{\frac{(\theta_{n,max} - \theta_0)^2 + (\theta_{z,max} - \theta_0)^2}{2}} / 1,41 + \theta_0 \quad (1)$$

Анализ применяемых в ремонтных депо режимов восстановительной обработки выявил, что температура формоустойчивости находится в диапазоне от 950 до 1000 °С. Однако ведущие фирмы-производители, например Sandvik Coromant [3], рекомендуют режимы обработки, соответствующие температуре формоустойчивости равной 850 °С. Следовательно, оптимизация применяемых при восстановлении про-

филя колеса режимов резания является одним из направлений снижения температуры формоустойчивости.

Формы износа режущего инструмента и экспериментальных характеристик (см. рис. 2) позволяют сделать вывод о том, что, несмотря на высокие значения температур при применяемых на практике режимах резания, преобладающим является влияние фактора, учитывающего напряженное состояние режущего лезвия [9].

В процессе обработки режущее лезвие испытывает нормальные и касательные напряжения. Однако действие нормальных напряжений на процессы деформации и изнашивания инструмента не велико, т.к. допустимые нормальные напряжения у применяемых марок твердосплавного инструментального материала существенно выше касательных напряжений.

В данной работе для оценки влияния напряжений использован метод Мичела, учитывающий действие сосредоточенных сил на режущий клин [10]. При этом касательные на

пряжения определяются через тангенциальную силу  $P_1$ , а нормальные через радиальную  $P_2$  (рис. 5).

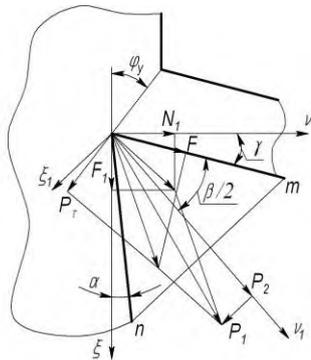


Рис. 5. Схема сил, действующих на клин режущего инструмента

Определение радиальных (сжимающих) напряжений необходимо для оценки прочности лезвия вблизи режущей кромки, где данные напряжения могут при определенных условиях

превышать предел прочности инструментального материала на сжатие и наряду с касательными напряжениями влиять на износ и деформацию режущего лезвия. Однако в большинстве случаев данным напряжением при расчетах можно пренебречь.

Найдем проекции сосредоточенных сил на оси координат, проецируя равнодействующие сил, расположенных на передней и задней поверхностях клина режущего инструмента.

Для этого сначала определим компоненты сил на передней поверхности режущего клина ( $P_\tau$  и  $F$ ) в системе координат  $\nu, \xi$ :

$$P_\tau = \frac{\bar{\tau}}{S_b \sin \varphi_y} S_b S t, \quad F = \frac{\bar{q}_F}{S_b} \frac{2C_1}{a} S_b S t. \quad (2)$$

Далее вычислим равнодействующую силы на передней поверхности в новой системе координат  $\nu_1, \xi_1$ :

$$R_{\xi_1} = R_\xi \cos(\gamma + \beta/2) - R_\nu \sin(\gamma + \beta/2) = P_\tau \frac{\cos(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} - F \frac{\sin(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)}, \quad (3)$$

$$R_{\nu_1} = R_\xi \sin(\gamma + \beta/2) + R_\nu \cos(\gamma + \beta/2) = P_\tau \frac{\sin(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} + F \frac{\cos(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)}.$$

Компоненты сил для задней поверхности определяются аналогично передней (см. рис. 5):

$$F_1 = \frac{q_3}{S_b} \frac{h_3}{a} S_b S t, \quad N_1 = \left( \frac{1}{1 + \varepsilon_z} \frac{h_3}{a} S_b S + q_N f_y \sin \gamma_f \right) t. \quad (4)$$

Принимая во внимание полученные зависимости, тангенциальная проекция силы резания имеет следующий вид:

$$P_1 = P_\tau \frac{\cos(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} - F \frac{\sin(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} + F_1 \cos(\gamma + \beta/2) - N_1 \sin(\gamma + \beta/2). \quad (5)$$

Принимая во внимание решение Мичела [3], уравнение для определения касательных напряжений в режущем клине (сечение  $m-n$ ) примет следующий вид:

$$\tau_m = -\frac{P_1 \operatorname{tg}^2 \beta/2 \cos^4 \beta/2}{bc \left( \frac{\beta}{2} - \frac{\sin \beta}{2} \right)} = -\left( \frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{P_1}{bc} K_1(\beta) = -\tau_0 K_1(\beta), \quad (6)$$

где  $\tau_0 = 0,57 \frac{P_1}{bc}$ ,  $K_1(\beta) = \frac{\sin^2 \beta}{(\beta - \sin \beta)(\pi/2 - 1)}$ .

Для описания пластической деформации режущего лезвия принято, что скорость данной деформации (ползучести) при одинаковой температуре формоустойчивости, зависит от отношения касательных напряжений в режущем

клине и предела прочности твердого сплава, определенного при испытании на изгиб, а влияние температуры на прочностные свойства инструментального материала учитывается соответствующим коэффициентом ( $K_2$ ).

Таким образом, с учетом того, что  $\tau_T = \sigma_T / \sqrt{3}$ , а также  $\frac{\pi/2-1}{\sqrt{3}} \approx \frac{1}{3}$ , формула для определения безразмерной характеристики  $\sigma_m$ , учитывающей влияние касательных напряжений в режущем клине на деформацию (скорость ползучести), примет следующий вид:

$$\sigma_m = \frac{P_1}{3bc\sigma_u^*K_2} K_1(\beta), \quad (7)$$

Проведем анализ напряженного состояния режущего инструмента при обработке профиля железнодорожных колес с учетом условий обработки. Оценим влияние угла заострения режущего клина резца на поправочный коэффициент  $K_1(\beta)$  (рис. 6)

Как показал анализ рис. 6 и зависимости (6), увеличение угла вызывает снижение

степени влияния касательных напряжений  $\tau_m$ .

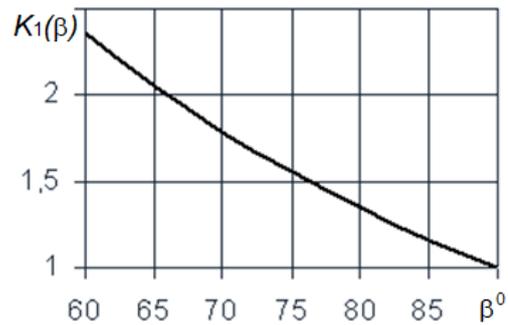


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $K_1(\beta)$  от угла заострения режущего клина резца

При износе резца по задней поверхности наблюдается снижение силы  $P_1$  (рис. 7, а) и касательных напряжений  $\tau_m$  (рис. 7, б) и, следовательно, уменьшается скорость ползучести.

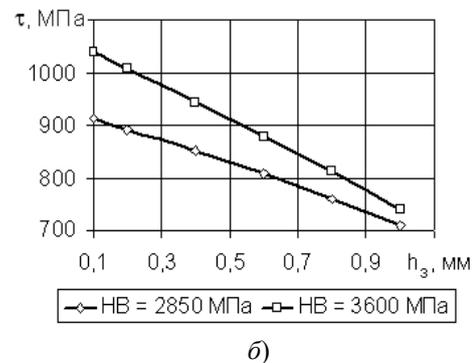
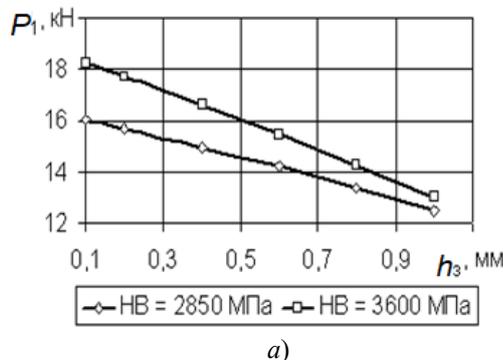


Рис. 7. Зависимости силы  $P_1$  (а) и напряжения  $\tau_m$  (б) от величины фаски износа задней поверхности при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8;  $\phi = 75^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $r = 4$  мм;  $t = 8$  мм;  $v = 45$  м/мин;  $s = 1,2$  мм/об)

Это хорошо согласуется с практическими наблюдениями, т.к. пластическая деформация режущего лезвия происходит интенсивнее на остром резце в первые минуты резания.

Следовательно, снижение напряжений при неизменной толщине срезаемого слоя можно обеспечить за счет увеличения размера фаски, расположенной на задней поверхности режущей пластины. Как следует из анализа и практических наблюдений, значения данной фаски, превышающие 0,3...0,4 мм, приводят к увели-

чению температуры задней поверхности, однако применение предварительного притупления с указанными параметрами позволит снизить интенсивность изнашивания и касательные напряжения на 50 МПа, а также увеличить прочность режущего клина в окрестности режущей кромки.

Кроме того, выявлено, что кроме фаски износа на силу  $P_1$  (рис. 8, а) и касательные напряжения (рис. 8, б) оказывает значительное влияние толщина срезаемого слоя.

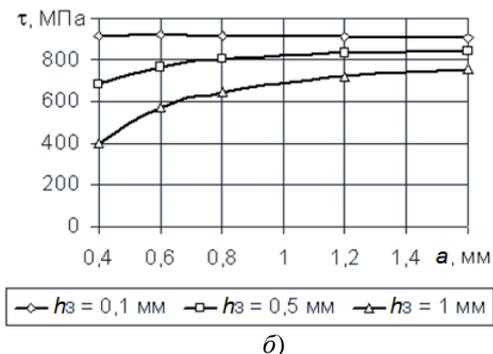
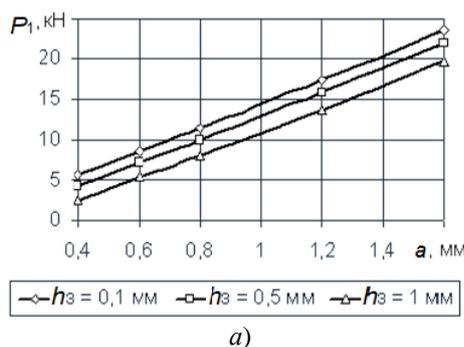


Рис. 8. Зависимости силы  $P_1$  (а) и напряжения  $\tau_m$  (б) от толщины срезаемого слоя при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8;  $\phi = 75^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $r = 4$  мм;  $t = 8$  мм;  $v = 45$  м/мин)

Для оценки условий пластической деформации при обработке профиля железнодорожных колес резанием, проанализируем без-

размерный комплекс (7) и влияние на него толщины срезаемого слоя и ширины фаски износа (рис. 9).

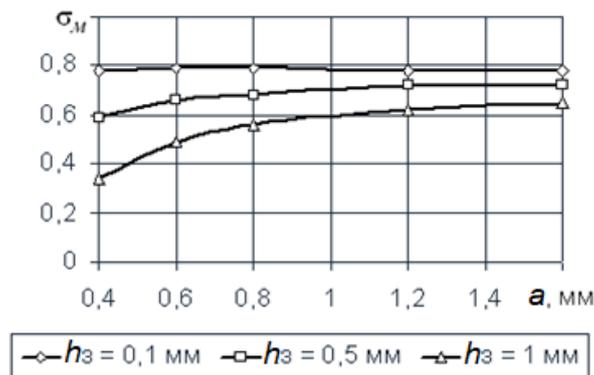


Рис. 9. Зависимость безразмерного комплекса  $\sigma_m$  от толщины срезаемого слоя и величины фаски износа задней поверхности при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8;  $\varphi = 75^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $r = 4$  мм;  $t = 8$  мм;  $v = 45$  м/мин)

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 9, позволяет сделать вывод о том, что процесс деформации (ползучести) режущего инструмента при обработке профиля железнодорожного колеса точением значительно сокращается при уменьшении толщины срезаемого слоя до величины 0,6...0,8 мм.

Таким образом, как следует из вышесказанного, в качестве основных факторов, влияющих на процесс изнашивания режущего лезвия при токарной обработке профиля железнодорожных колес, выступают температура формоустойчивости и безразмерный комплекс, описывающий процесс деформации (ползучести) режущего инструмента. Данная взаимосвязь может быть выражена графически в виде вогнутых кривых (рис. 10) и описывающей их зависимости (8).

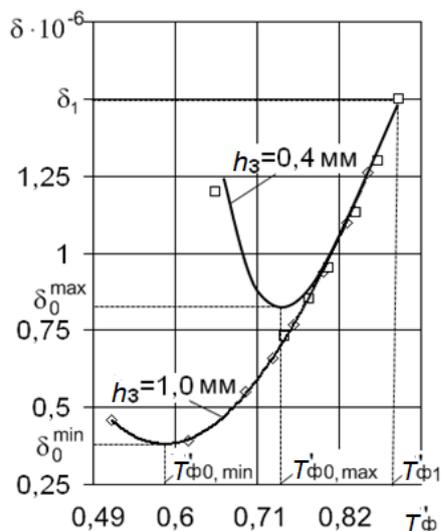


Рис. 10. Обработка колесной стали призматическим резцом марки Т14К8;  $\varphi = 75^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $r = 4$  мм;  $t = 8$  мм;  $s = 1,2$  мм/об;  $v = 38$  м/мин

$$L = \int_0^T v d\tau = \int_{h_0}^{h^*} \frac{dh}{\delta_L(\theta, \sigma)} \quad (8)$$

Полученную зависимость можно использовать при анализе режимов резания токарной обработки железнодорожных колес как при оптимизации технологического процесса, так и при разработке нового.

### Выводы

1. Установлено, что неравномерность изменения ширины фаски износа на задней поверхности особенно выражена при повышенных подачах и небольших радиусах при вершине  $r = 4$  мм. Снизить неравномерность износа при сохранении используемой подачи возможно за счет применения пластин с большим радиусом закругления вершины ( $r = 15$  мм).

2. Значение фаски  $h_z$  возможно использовать в качестве одного из главных критериев износа, т.к. величина фаски износа задней поверхности резца при обработке профиля железнодорожного колеса пропорциональна величине опускания режущей кромки.

3. Выявлено, что при обработке железнодорожных колес температурным фактором, связанным с изнашиванием режущего лезвия, выступает температура формоустойчивости.

4. Для учета пластической деформации режущего лезвия, получена зависимость для определения безразмерного комплекса, учитывающего влияние касательных напряжений в режущем клине на скорость ползучести.

5. Описана взаимосвязь между температурой формоустойчивости и безразмерным комплексом, учитывающим касательные напряжения в режущем клине.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крутько, А.А., Кушнер, В.С., Воробьев, А.А. Повышение эффективности восстановительной токарной обработки железнодорожных колесных пар: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 176 с.
2. Иванова, И.А., Кушнера, В.С. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 224 с.
3. Воробьев, А.А. Совершенствование технологии восстановления колесных пар: монография. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011. – 186 с.
4. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава: монография / О.С. Валинский, А.А. Воробьев, С.И. Губенко и др. / Казань: Бук, 2022. – 324 с.
5. Воробьев, А.А., Потахов, Д.А., Крутько, А.А., Фисенко, В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния и прочности режущего инструмента при обработке железнодорожных колес // Омский научный вестник. – 2015. – № 140. – С. 62-66.
6. Воробьев, А.А., Кушнер, В.С., Крутько, А.А., Крутько, А.А. Анализ условий работы твердосплавного инструмента в тяжелых условиях обработки колесных сталей // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2015. – №3 (31). – С. 24-29.
7. Влияние средней температуры контакта при резании на основные характеристики качества поверхностного слоя /А.Д. Макаров и др. // Теплофизика технологических процессов. – Куйбышев: Кн. изд-во. – 1970. – С. 270-275.
8. Совершенствование расчета температуры при резании на основе термомеханического подхода / В.С. Кушнер, М.Г. Сторчак, А.А. Воробьев и др. // Омский научный вестник. – 2009. – №1 (77). – С. 10-14.
9. Кушнер, В.С., Жавнеров, А.Н., Горшенин, В.А. Влияние температуры и напряжений на интенсивности формоизменения режущего лезвия при обработке никелевых сплавов // Омский научный вестник. – 2007. – № 3(60). – С. 26-28.
10. Тимошенко, С.П., Гудьер, Дж. Теория упруго-

сти: Пер. с англ. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

## REFERENCES

1. Krutko, A.A., Kushner, V.S., Vorobyev, A.A. Improving the efficiency of restorative turning of railway wheel sets: monograph, Omsk: Publishing house of OmSTU, 2013, 176 p.
2. Ivanova, I.A., Kushner, V.S. The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on the wear and recovery modes of the profile of wheel pairs: monograph, Omsk: Publishing house of OmSTU, 2015, 224 p.
3. Vorobyev, A.A. Improvement of wheelset restoration technology: monograph, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011, 186 p.
4. Valinsky, O.S., Vorobyov, A.A., Gubenko, S.I. and others. Improving the performance of wheel sets of rolling stock: monograph, Kazan: Buk, 2022, 324 p.
5. Vorobyev, A.A., Potakhov, D.A., Krutko, A.A., Fisenko, V.I. Evaluation of the stress-strain state and strength of the cutting tool when turning railway wheels // Omsk Scientific Bulletin, 2015, No. 140, PP. 62-66.
6. Vorobyov, A.A., Kushner, V.S., Krutko, A.A., Krutko, A.A. Analysis of the working conditions of a carbide tool under severe conditions of wheel steel processing // Bulletin of the Institute of Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering, 2015, № 3(31), PP. 24-29.
7. Makarov, A.D. et al. The influence of the average contact temperature during cutting on the main characteristics of the quality of the surface layer // Thermophysics of technological processes, Kuibyshev: Publishing House, 1970, PP. 270-275.
8. Kushner, V.S., Storchak, M.G., Vorobyev, A.A., etc. Improvement of temperature calculation during cutting on the basis of thermomechanical approach // Omsk Scientific Bulletin, 2009, № 1(77), PP. 10-14.
9. Kushner, V.S., Zhavnerov, A.N., Gorshenin, V.A. Influence of temperature and stresses on the intensity of the cutting blade shape change during processing of nickel alloys // Omsk Scientific Bulletin, 2007, № 3(60), PP. 26-28.
10. Timoshenko, S.P., Goodyear, J. Theory of elasticity: Trans. from English, M.: Nauka. The main edition of the physical and mathematical literature, 1979, 560 p.

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

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

Статья поступила в редакцию 16.09.2022; одобрена после рецензирования 22.09.2022; принята к публикации 28.10.2022

The article was submitted 16.09.2022; approved after reviewing 22.09.2022; accepted for publication 28.10.2022.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №12 (138). С. 16-20.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 16-20.

Научная статья  
УДК 621.923.9.  
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-16-20

## Ленточное глубинное шлифование – прогрессивный вид механической обработки

Юрий Михайлович Зубарев<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Александр Владимирович Приемышев<sup>2</sup>, к.т.н.,  
Виктор Валентинович Звоновских<sup>3</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический  
университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2,3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

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

<sup>2</sup> priemyshev52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных работ по ленточному глубинному шлифованию стали 20X13 и сплава ВТЗ-1. Показывается преимущество ленточного глубинного шлифования, которое позволяет значительно повысить эффективность обработки заготовок деталей машин, особенно имеющих криволинейные поверхности, такие как лопатки паровых и газовых турбин, лопасти гребных винтов и др.

**Ключевые слова:** ленточное шлифование, удельная работа, эффективная мощность, период стойкости ленты, точность и качество обработки

**Для цитирования:** Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Звоновских В.В. Ленточное глубинное шлифование – прогрессивный вид механической обработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 16-20. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-16-20.

Original article

## Abrasive-belt creep feed grinding as a progressive type of machining operation

Yuri M. Zubarev<sup>1</sup>, Dr.Sc.Tech.,  
Alexander V. Priemyshev<sup>2</sup>, Can.Sc.Tech.,  
Viktor V. Zvonovskikh<sup>3</sup>, Can.Sc.Tech.

<sup>1</sup> St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg, Russia

<sup>2,3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia  
iuzubarev@mail.ru, prie-myshev52@mail.ru

**Abstract.** The results of experimental work on abrasive-belt creep feed grinding of 20X13 steel and VT3-1 alloy are presented. The advantage of abrasive-belt creep-feed grinding, which allows significant increasing of the efficiency of work on a workpiece of machine parts, particularly having cam surfaces, such as steam and gas turbine blades, propeller blades, etc., is shown.

**Keywords:** abrasive-belt grinding, specific work, effective power, efficient belt life, processing accuracy and performance

**For citation:** Zubarev Yu. M., Priemyshev A. V., Zvonovskikh V. V. Abrasive-belt creep feed grinding as a progressive type of machining operation. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 16-20. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-16-20.

Главными задачами металлообработки в машиностроении являются: значительное повышение производительности труда, сокращение объема механической обработки и уменьшения ее себестоимости. Одним из инновационных методов, позволяющих решить эти задачи, является глубинное ленточное шлифование. Кинематически этот вид шлифования аналогичен глубинному шлифованию «жестким» абразивным кругом и может быть выполнен при глубинах резания до 10 мм и более за один рабочий ход [1, 2]. Этот метод позволяет совместить в одной операции черновую и чистовую обработку, исключив традиционные операции – точение, фрезерование, строгание и др., т.е. лезвийную обработку. При этом оборудование для ленточного шлифования проще, а значит и дешевле, а инструмент (абразивная лента) значительно дешевле, чем лезвийный инструмент, а также чем абразивные круги, особенно круги для скоростного и высокоскоростного шлифования.

Основное направление для применения глубинного шлифования абразивным кругом – это получение глубоких канавок, пазов, лысок. Шлифование с использованием инструмента в виде абразивной ленты открывает широкие возможности для финишной обработки поверхностей заготовок, имеющих разную геометрическую форму. Такие поверхности имеют, например, турбинные лопатки, лопасти гребных винтов, шнеков и др. При этом съём металла в единицу времени больше, чем при лезвийной обработке, качество и точность обработанной поверхности выше, а себестоимость операции значительно ниже [3, 4]. В отечественном машиностроении его внедрение сдерживается отсутствием технологических рекомендаций и соответствующего оборудования.

Условия проведения эксперимента: модернизированный под ленточное шлифование плоскошлифовальный станок 3E711, заготовка – призматический брусок из стали 20x13 и сплава ВТ3-1. Абразивные ленты 14AP40C1C; 51CP60B831Y8CB и ленты фирмы «Norton» R884P40. Схема шлифования встречная. Скорость резания –  $v_d = 15$  м/с.

Для того, чтобы решить задачу по определению режимов шлифования, удобно воспользоваться таким понятием, как приведенное или удельное усилие  $P'$  прижима ленты к поверхности заготовки [4].

$$R'_y = \frac{P_y}{h}; \text{Н/мм},$$

где  $P_y$  – сила прижима, Н;  $h$  – ширина контакта ленты с обрабатываемой поверхностью, мм.

Скорость съема металла определяется по формуле [3]:

$$Q_m = Q'_m \cdot h = t \cdot S_k \cdot v_u; \text{мм}^3/\text{мин}$$

где  $Q'_m$  – удельная скорость снятия металла (скорость снятия металла, приведенная к 1 мм ширина  $h$  контакта ленты с обрабатываемой поверхностью), мм;  $t$  – глубина шлифования, мм;  $s_k$  – подача, мм/ход,  $v_u$  – скорость продольного движения заготовки, мм/мин.

Период стойкости абразивной ленты определяется по времени обработки до появления видимых следов прижогов на поверхности или по моменту проскальзывания ленты на ведущем режиме, что соответствует ее «засаливанию» или полному износу.

В процессе шлифования контролировали температуру в зоне резания с помощью полупроводниковой константовой термопары, оценивали качество шлифованной поверхности (шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения) и точность обработки.

Для повышения производительности обработки схема глубинного ленточного шлифования имеет значительные преимущества перед другими методами шлифования. Это происходит за счет большего числа абразивных зерен, которые одновременно участвуют в работе диспергирования. Таких зерен примерно в 10 – 15 раз больше, чем при многоходовом шлифовании. Удельный съём металла увеличивается в 20 – 60 раз.

При  $t = 10$  мм и  $v_u = 80$  мм/мин,  $Q_{уд} = 800$  мм<sup>3</sup>/мин·мм. Толщина среза при глубинном ленточном шлифовании также значительно уменьшается – до 10 раз.

Удельную работу можно определить как [3, 4]:

$$A_{уд} = \frac{P_z \cdot v_d}{Q}, \text{Дж/мм}^3,$$

где  $P_z$  – сила резания, Н;  $v_d$  – линейная скорость перемещения ленты, м/с;  $Q$  – скорость съема металла, мм<sup>3</sup>/мин.

Эффективная мощность ленточного шлифования:

$$N_3 = \frac{P_z \cdot V_d}{1020}, \text{ кВт};$$

Скорость съема металла  $Q = Q_{уд} \cdot h$ .

Тогда удельную работу при глубинном ленточном шлифовании вычислим по формуле:

$$A_{уд} = \frac{1020 \cdot N_3}{Q_{уд} \cdot h} = \frac{1020 \cdot N_{эф.уд}}{Q_{уд}};$$

Для исследуемых материалов  $N_{эф.уд}$  находится в пределах 0,2...0,3 кВт/мм [1].

Были получены эмпирические зависимости  $N_{эф.уд}$ ;  $T$  (период стойкости абразивной ленты, мин);  $\theta$  (температура в зоне резания, °C);  $Ra$  (высота шероховатости обработанной поверхности, мкм) от режимов резания,

$$Ra = C \cdot v_u^x \cdot t^y.$$

В табл. 1 приведены значения коэффициентов  $C$  и показателей степени  $X$  и  $Y$  при вычислении указанных параметров.

### 1. Значения коэффициента $C$ и показателей степени $X$ и $Y$ в эмпирических зависимостях

	20X13			BT3-1		
	$C$	$X$	$Y$	$C$	$X$	$Y$
$N_{эф.уд}$ ; кВт/мм	0,177	0,03	0,07	0,015	0,04	0,10
$T$ , мин	29310	-1,52	-1,56	4074	-1,33	-1,91
$\theta$ , °C	12,62	0,68	0,59	66,53	0,47	0,90
$Ra$ , мкм	0,164	0,44	0,33	0,335	0,31	0,26

Следует отметить, что при увеличении удельного съема металла до 2,0...2,5 мм<sup>3</sup>·с происходит резкое снижение удельной работы шлифования для данных материалов, при дальнейшем его увеличении, величина  $A_{уд}$  практически мало изменяется (рис. 1).

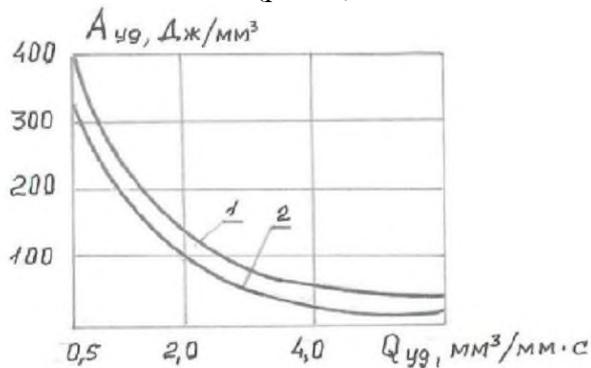


Рис. 1. Зависимость удельной работы  $A_{уд}$  шлифования от удельного съема металла:

1 – сталь 20X13; 2 – сплав BT3-1

Исходя из приведенных результатов вытекает вывод и о повышении эффективной мощности резания при реализации операции ленточного глубинного шлифования,  $N_{эф.уд}$  увеличивается прямо пропорционально, если увеличивать ширину среза.

При глубинном шлифовании лентой «Nogtop» удельный съем металла увеличивается в 1,5...2 раза по сравнению с обработкой отечественными лентами, а  $N_{эф.уд}$  увеличивается лишь на 20...40%. Это подтверждает необходимость уделять должное внимание качеству отечественного абразивного инструмента.

При оценке периода стойкости лент  $T$  наиболее значимым элементом режима резания является глубина резания. Увеличение глубины в 4 раза при  $v_u = \text{const}$  приводит к снижению  $T$  в 5 раз. Увеличение  $t$  приводит к тому, что площадь контакта ленты с обрабатываемой заготовкой значительно меняется в сторону увеличения. Возрастает тепловая и силовая нагрузки на режущие зерна ленты.

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что период стойкости при глубинном ленточном шлифовании с постоянным удельным съемом металла снижается, если увеличиваем глубину резания ( $t = 2...10$  мм;  $v_u = 40...320$  мм/мин) для всех исследованных диапазонов режимов резания. Объясняется это значительным увеличением площади контакта ленты с обрабатываемой поверхностью.

Что касается температур в зоне резания и теплового баланса между контактирующими телами, то все эти параметры значительно изменяются. Это происходит за счет увеличения длины контакта ленты с заготовкой. При этом максимальная контактная температура наблюдается на передней кромке источника тепла (ленты). При этом снижается теплонапряженность шлифованной поверхности. Это подтверждается как аналитическими расчетами, так и данными экспериментов. Объясняется это тем, что при ленточном глубинном шлифовании с малыми скоростями подачи изделия, длительность воздействия теплового источника на

обрабатываемую поверхность возрастает. С увеличением площади контакта ленты с изделием выделяющееся тепло распределяется на большой объем металла и, следовательно, увеличивается время на его отвод до выхода на обработанную поверхность заготовки.

Анализ экспериментальных данных показывает, что наибольшая контактная температура возникает при обработке титанового сплава. При этом увеличение глубины шлифования оказывает наиболее существенное влияние на рост температуры также при обработке заготовок из сплава ВТ3-1.

Максимальные значения контактных температур соответствуют следующим режимам резания:

Сталь 20Х13:

$\theta = 950^\circ\text{C}$ ; при  $t = 8$  мм;  $V_u = 40$  мм/мин;

$Q_{уд} = 5,3$  мм<sup>3</sup>/мм·С

Сплав ВТ3-1:

$\theta = 1050^\circ\text{C}$ ; при  $t = 4$  мм;  $V_u = 40$  мм/мин;

$Q_{уд} = 2,7$  мм<sup>3</sup>/мм·С

В результате выполненных исследований установлено, что при ленточном глубинном шлифовании поверхностные слои заготовок из стали 20Х13 и сплава ВТ3-1 упрочняются по сравнению с исходной структурой в среднем в 2 – 3 раза. Степень упрочнения и толщина упрочненного слоя уменьшаются с уменьшением скорости подачи изделия  $v_u$  и глубины резания  $t$ . При шлифовании с постоянным съемом металла увеличение скорости перемещения заготовки и пропорциональное уменьшение глубины резания также приводит к снижению степени упрочнения. Это объясняется уменьшением числа абразивных зерен ленты, одновременно участвующих в работе шлифования, что приводит к снижению силы резания, а следовательно, и к снижению степени пластической деформации.

Для исследования возможностей повышения качества шлифуемых поверхностей были выполнены исследования, при которых обработку осуществляли за два рабочих хода: черновое ленточное шлифование при  $t = 5...12$  мм и чистовое, при  $t = 0,1$  мм. Глубина резания на чистовом рабочем ходе обусловлена величиной дефектного поверхностного слоя, полученного при черновом глубинном шлифовании.

Результаты исследований показали, что дефектный поверхностный слой после черного рабочего хода, полностью удаляется, если применить чистовой рабочий ход с режимами резания  $v_u = 640$  мм/мин и  $t = 0,1$  мм.

На рис. 2 показано влияние режимов резания на величину и знак остаточных технологических напряжений в поверхностном слое заготовок.

Необходимо отметить, что в большинстве случаев на поверхности заготовок формируются напряжения сжатия. Дополнительный чистовой ход, практически не меняя характера распределения напряжений, снижает напряженность поверхностного слоя в 1,5 – 2 раза.

Высота шероховатости поверхности заготовок после черного рабочего хода находится в пределах  $Ra = 0,9...0,7$  мкм. Введение чистового рабочего хода улучшает эти показатели  $Ra = 0,3...0,5$  мкм.

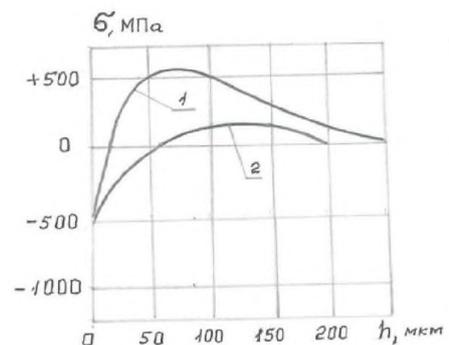


Рис. 2. Распределение технологических остаточных напряжений при ленточном глубинном шлифовании стали 20Х13:

1 – шлифование за один рабочий ход; 2 – шлифование с чистовым рабочим ходом

Таким образом, для операций ленточного шлифования можно назначать сочетание черного и чистового рабочих ходов, создающих благоприятные технологические остаточные напряжения, повышающих точность обработки и качество обработанных поверхностей.

### Заключение

Результаты исследований показывают, что в ряде случаев применение операций глубинного ленточного шлифования целесообразно и внедрение этого процесса в промышленность дает экономический эффект. Особенно эффективен метод при использовании рабочих циклов, которые дают возможность рационально назначать режимы резания и обеспечивать требуемую точность и качество поверхности обрабатываемых заготовок.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кремень, З.И., Юрьев, В.Г., Бабошкин, А.Ф. Технология шлифования в машиностроении / под общ. ред. З.И. Кременя. – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.
2. Макаров, В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. – СПб.: Лань, 2013. – 320 с.
3. Зубарев, Ю.М., Юрьев, В.Г. Абразивные инструменты. Разработка операций шлифования. – СПб.: Лань, 2018. – 360 с.
4. Стратиевский, И.Х., Юрьев, В.Г., Зубарев, Ю.М. Абразивная обработка. Справочник. – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.

## REFERENCES

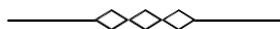
1. Kremen Z.I., Yuryev V.G., Baboshkin A.F. Grinding technology in mechanical engineering / under the general ed. Z.I. Kremen. about Z.I. Flint. – St. Petersburg: Polytechnic, 2007. – 424 p.
2. Makarov V.F. Modern methods of high-efficiency abrasive treatment of heat-resistant steels and alloys. – St. Petersburg: Lan, 2013. – 320 p.
3. Zubarev Yu.M., Yuryev V.G. Abrasive tool. Development of grinding operations. – St. Petersburg: Lan, 2018. – 360p.
4. Stratievsky I.H., Yuryev V.G., Zubarev Yu.M. Abrasive treatment. Handbook. – M.: Mechanical Engineering, 2010. – 352 p.

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

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

Статья поступила в редакцию 31.08.2022; одобрена после рецензирования 08.09.2022; принята к публикации 14.09.2022.

The article was submitted 31.08.2022; approved after reviewing 08.09.2022; assepted for publication 14.09.2022.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №12 (138). С. 21-26.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 21-26.

Научная статья  
УДК 621.91  
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-21-26

## Исследование параметров процесса при обработке фрезами с различным шагом между зубьями

Александр Николаевич Унянин<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Александр Владимирович Чуднов<sup>2</sup>, студент  
<sup>1,2</sup> Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия  
<sup>1</sup>a\_un@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>  
<sup>2</sup>chudnov73ru@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Представлены полученные аналитические зависимости, позволяющие определить параметры процесса цилиндрического фрезерования и фрезерования периферией концевых фрез с различным шагом между зубьями. Численное моделирование с использованием данных зависимостей позволило выявить закономерность изменения геометрических параметров среза, сил резания и трения и температур в зонах контакта зуба фрезы со стружкой и заготовкой и в поверхностных слоях заготовки в зависимости от продолжительности контакта зуба фрезы с обрабатываемой поверхностью заготовки и шага зубьев фрезы.

**Ключевые слова:** фрезерование, сила, температура, неравномерный шаг, модель, заготовка

**Для цитирования:** Унянин А.Н., Чуднов А.В. Исследование параметров процесса при обработке фрезами с различным шагом между зубьями // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 21-26. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-21-26.

Original article

## Process parameters survey in milling with various tooth cutters

Alexander N. Unyanin<sup>1</sup>, Dr.Sc.Tech.,  
Alexander V. Chudnov<sup>2</sup>, student  
<sup>1,2</sup>Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia  
<sup>1</sup>a\_un@mail.ru, <sup>2</sup>chudnov73ru@yandex.ru

**Abstract.** The obtained analytical dependences, which allow determining the parameters of flank milling and peripheral milling using butt mills with various tooth cutters are presented. Computer simulation using these dependencies allows revealing of regularity in cut geometric parameters change, cutter force and friction load, as well as temperatures in the interface of the cutter tooth with facing and rough piece and also in the strand shell depending on the duration of the cutter tooth contact with the workpiece surface and the teeth distance.

**Keywords:** milling, force, temperature, irregular pitch, model, rough piece

**For citation:** Unyanin A. N., Chudnov A. V. Process parameters survey in milling with various tooth cutters. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 21-26. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-21-26.

Применение инструмента с неравномерным шагом между зубьями является эффективным средством повышения производительности процесса обработки и качества деталей [1]. Повышение эффективности процесса обработки фрезами с неравномерным шагом обусловлено, главным образом, уменьшением амплитуды колебаний, возникающих в процессе фрезерования. Амплитуда вынужденных колебаний снижается, поскольку период времени между работой смежных зубьев фрезы не является постоянным [2].

Фрезерование цилиндрическими фрезами и

периферией концевых фрез являются широко распространенными методами обработки. Однако зависимость параметров процесса обработки, в том числе сил и температур, от шага зубьев фрезы выявлена недостаточно полно. Поскольку температура оказывает значительное влияние на интенсивность изнашивания инструмента, качество обработанных поверхностей деталей и производительность обработки, возможность ее определения позволит назначить рациональные условия и режим обработки.

В работах [3, 4] рассмотрена двумерная за-

дача теплообразования в сечении фрезы, перпендикулярном ее оси и представлены модели, позволяющие выполнить расчет температурного поля, возникающего в процессе фрезерования цилиндрическими фрезами и периферией концевых фрез. Модели учитывают: взаимное влияние тепловых источников от последовательно работающих зубьев фрезы; зависимость теплофизических параметров материалов фрезы, заготовки и стружки и механических свойств материала заготовки от температуры этих объектов; изменение параметров процесса в зависимости от продолжительности контакта зуба фрезы с обрабатываемой поверхностью заготовки.

Полагали, что источниками тепловыделения являются три зоны: зона деформирования (стружкообразования) материала заготовки (линия  $ED$  на рис. 1); зона контакта зуба со стружкой ( $EN$ ); зона контакта зуба с заготовкой ( $EV$ ) [3].

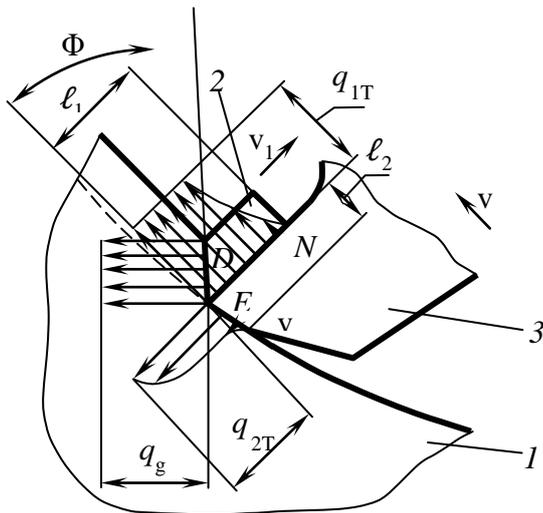


Рис. 1. Схема теплообмена в зоне резания зубом фрезы:

1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – зуб фрезы

Зависимость, описывающая изменение глубины внедрения зуба в заготовку при перемещении его относительно обрабатываемой поверхности:  $a_m = S_z \cdot \sin \alpha$ , где  $S_z$  – подача на зуб фрезы, мм/зуб;  $\alpha$  – текущий угол контакта зуба фрезы с заготовкой, град. Вследствие изменения параметра  $a_m$  длина контакта стружки с заготовкой, коэффициент укорочения стружки, сила резания, мощности источников тепловыделения и соответствующие им плотности тепловых потоков не являются постоянными на траектории контакта зуба с заготовкой.

Для расчета мощностей тепловыделения использовали зависимости [3]:

$$\begin{aligned} W_{1T} &= F_1 \cdot V_1; \\ W_{2T} &= F_2 \cdot V; \\ W_g &= P_z \cdot V - (W_{1T} + W_{2T}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $W_g$ ,  $W_{1T}$ ,  $W_{2T}$  – мощности источников тепловыделения в зоне деформирования материала заготовки ( $W_g$ ), в зоне контакта передней поверхности зуба фрезы со стружкой ( $W_{1T}$ ) и в зоне контакта задней поверхности с заготовкой ( $W_{2T}$ ), Вт;  $F_1$  и  $F_2$  – силы трения в зонах контакта передней поверхности зуба фрезы со стружкой и задней поверхности с заготовкой соответственно, Н;  $v$  – скорость резания, м/с;  $P_z$  – главная составляющая силы фрезерования одним зубом фрезы, Н;  $v_1$  – скорость перемещения стружки относительно передней поверхности зуба фрезы, м/с.

Определяли силы трения и силу резания, приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы. Угол наклона винтовой канавки фрезы в зависимостях не учитывали, поскольку его влияние на силы незначительное и при угле, меньшем  $50^\circ$ , коэффициент, отражающий влияние этого угла, равен единице [5].

Из зависимостей для расчета сил резания, приведенных в работе [6], получены формулы для расчета сил трения:

$$F_1 = 1,155 \cdot \sigma_{St} \cdot u \cdot a_m \cdot 0,0001 \cdot \left( \mu + \frac{\mu_1 (1 - \operatorname{tg} \gamma)}{\sin \gamma} \right) \quad (2)$$

$$F_2 = 1,155 \cdot \mu_2 \cdot \sigma_{St} \cdot l_2 \cdot 0,001, \quad (3)$$

где  $\sigma_{St}$  – напряжение текучести материала заготовки в зоне деформирования (стружкообразования), соответствующее температуре в этой зоне, Па;  $\mu$  – коэффициент трения ( $\mu = 0,5$  при обработке без применения смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) и  $\mu = 0,3$  при обработке с его применением);  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – коэффициенты трения в зонах контакта передней поверхности зуба со стружкой и задней поверхности с заготовкой соответственно;  $\gamma$  – передний угол зуба фрезы, град.;  $l_2$  – размер зоны контакта задней поверхности зуба с заготовкой, м;  $a_m$  – глубина внедрения зуба в заготовку, м;  $u$  – коэффициент.

$$\sigma_{St} = \sigma_S \left( 1 - \frac{T_g}{T_p} \right), \quad (4)$$

где  $\sigma_S$  – напряжение текучести материала заготовки при температуре  $20^\circ\text{C}$ , Па;  $T_g$  – температура в зоне деформирования зубом фрезы материала заготовки,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_p$  – температура плавления материала заготовки,  $^\circ\text{C}$ .

Главную составляющую силы резания рассчитывали по зависимости, предложенной в работе [6]:

$$P_z = 1,155 \cdot \sigma_{St} \cdot u \cdot a_m \cdot 0,001 \cdot \left\{ 1 + \mu_1(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2k_c} \right\} \cdot \cos \gamma +$$

$$+ \frac{k_c}{4u \cdot \cos \gamma} + \mu \cdot \sin \gamma + \frac{\mu_2 \cdot l_2}{u \cdot a_m} + \frac{k_c \cdot a_m}{4u \cdot 0,001 \cdot \cos \gamma} \}, \quad (5)$$

где  $k_c$  – коэффициент укорочения стружки.

Длину контакта стружки с зубом фрезы определяли по зависимости [7]:

$$l_1 = a_m \cdot k_c^{0,1} \cdot [k_c \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma]. \quad (6)$$

Максимальная глубина внедрения зуба в заготовку при встречном фрезеровании (рис. 2):

$$a_{m,max} = BC = S_z \cdot \sin \alpha_{max}, \quad (7)$$

где  $S_z$  – подача на зуб фрезы, мм/зуб.

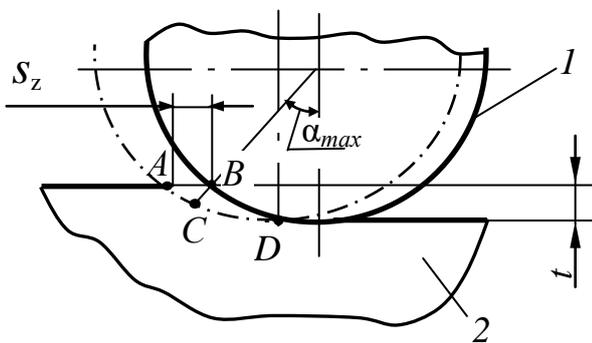


Рис. 2. Схема к расчету глубины внедрения зуба в заготовку:

1 – фреза; 2 – заготовка

$$\alpha_{max} = \arccos \frac{D - 2 \cdot t}{D}, \quad (8)$$

где  $D$  – наружный диаметр фрезы, мм;  $t$  – глубина резания, мм.

Теплообмен на поверхностях объектов (заготовки, зуба фрезы и стружки), контактирующих с внешней средой – воздухом или смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ), задан в форме закона Ньютона-Рихмана [8].

Имея данные о распределении тепловых потоков между контактирующими объектами (зубом фрезы, стружкой и заготовкой), можно рассчитать температуры этих объектов, решив уравнения теплопроводности для каждого из них. Однако, чтобы воспользоваться уравнениями теплопроводности, необходимо знать количественные данные по распределению тепловых потоков между объектами. Имеющаяся информация свидетельствует о значительном разбросе данных по распределению тепловых потоков. В частности, аргументами зависимостей для расчета долей тепловых потоков, поступающих в контактирующие объекты, являются коэффициенты теплопроводности этих объектов. Однако на этапе расчета распределе-

ния тепловых потоков температуры объектов не известны. Это не позволяет учесть зависимость коэффициентов теплопроводности от температуры, за счет чего можно получить значительную ошибку. Поэтому уравнения теплопроводности контактирующими объектами (зуба фрезы, стружки и заготовки) решали совместно, учитывая общие граничные условия в зонах контакта.

Поскольку аналитическим путем решить систему уравнений с учетом зависимостей теплофизических характеристик материалов от температуры затруднительно, уравнения решали численным методом конечных элементов. Составляли дискретные аналоги уравнений теплопроводности, а для расчета параметров процесса фрезерования, в том числе температурного поля, использовали специальные программы [4].

Период времени контакта зуба с заготовкой разбит на малые промежутки  $\Delta t$ . Температура, рассчитанная в зоне деформирования зубом материала заготовки (температура в зоне стружкообразования  $ED$  на рис. 1) в данный момент времени, использовалась программой для расчета напряжения текучести материала заготовки в последующий момент времени.

Численное моделирование температурного поля выполнили для случая встречного фрезерования заготовки из стали 40Х фрезой, изготовленной из твердого сплава Т5К10 диаметром 20 мм и имеющей 8 зубьев, высоту профиля зуба равную 4 мм и передний угол  $\gamma = 10^\circ$ . Элементы режима резания: скорость резания  $v = 3$  м/с; скорость подачи  $v_s = 1$  м/мин; глубина резания  $t = 1$  мм [9]; коэффициенты трения  $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$  [6, 10]; размер площадки контакта задней поверхности зуба с заготовкой  $l_2 = 0,2$  мм.

Напряжение текучести материала заготовки, плотности, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости материалов объектов в зависимости от температуры определяли, ориентируясь на справочные данные.

Варьировали шагом зубьев, который принимали согласно данным [9] равным  $t_z = 12,56$  мм, а также 10 и 15 мм, т.е. отличающимся от рекомендуемого значения в большую и меньшую сторону. Силу резания и силы трения, мощности источников тепловыделения и

температуры фиксировали при контакте с заготовкой 25-го из последовательно работающих зубьев, когда поверхностные слои заготовки в достаточной степени прогреты в результате ра-

боты предшествующих зубьев.

В табл. 1 приведены параметры процесса, зафиксированные в различные моменты времени контакта зуба с заготовкой.

**1. Зависимость параметров процесса резания от момента времени  $t_{\text{контакта}}$  зуба с заготовкой:  $t_z = 12,6$  мм**

Параметры процесса	Момент времени работы зуба $\tau$ , с			
	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$3,28 \cdot 10^{-4}$	$6,56 \cdot 10^{-4}$	$12,5 \cdot 10^{-4}$
Глубина внедрения зуба в заготовку $a_m$ , мкм	2,2	6,0	13,0	25,2
Составляющая силы резания $P_z$ , Н	52,1	58,0	68,0	93,4
Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба $F_1$ , Н	3,1	9,1	18,0	36,8
Сила трения зуба о заготовку $F_2$ , Н	48,5	47,5	47,2	50,8
Мощность источника тепловыделения в зоне контакта стружки с зубом $W_1$ , Вт	4,6	13,6	27,0	55,2
Мощность источника тепловыделения в зоне деформирования $W_g$ , Вт	6,0	17,8	35,5	72,7
Средняя температура в зоне контакта зуба со стружкой $T_1$ , К	772	843	874	867
Средняя температура в зоне контакта зуба с заготовкой $T_2$ , К	709	857	912	916

С увеличением времени контакта значительно (в 11,5 раза) увеличивается глубина  $a_m$  внедрения зуба в заготовку (см. (7), (8)). При этом главная составляющая силы резания  $P_z$  увеличивается на 79 % (5), а сила трения стружки о переднюю поверхность зуба  $F_1$  выросла в соответствии с зависимостью (2) пропорционально увеличению глубины внедрения  $a_m$ .

Сила трения зуба о заготовку  $F_2$  не зависит от параметра  $a_m$  (3), поэтому изменилась незначительно – на 4,5 %. Причиной изменения силы  $F_2$  является изменение напряжения текучести обрабатываемого материала в области пластической деформации  $\sigma_{S_1}$ , которое зависит от температуры деформируемого слоя.

Увеличение сил приводит к значительному росту мощностей источников тепловыделения: мощность источника тепловыделения в зоне контакта стружки с зубом  $W_1$  и мощность источника тепловыделения в зоне деформирования  $W_g$  (1) выросли в 12 раз. При этом мощность источника тепловыделения в зоне контакта зуба с заготовкой  $W_2$  с увеличением времени контакта  $\tau$  изменяется незначительно.

В результате средние температуры в зоне контакта зуба со стружкой  $T_1$  и в зоне контакта зуба с заготовкой  $T_2$  с увеличением времени  $\tau$  увеличиваются на 12 и 29 % соответственно.

Температура  $T_2$  значительно изменяется с увеличением времени  $\tau$  при незначительном изменении плотности источника тепловыделения  $W_2$ . Вероятно на температуру  $T_2$  оказывают

влияние и другие источники тепловыделения, в частности, в зоне деформирования  $W_g$ , интенсивность которого значительно изменяется при увеличении времени  $\tau$ .

При варьировании шагом зубьев параметры процесса фрезерования фиксировали в момент времени работы зуба, равный  $\tau = 12,5 \cdot 10^{-4}$  с, когда толщина срезаемого слоя незначительно меньше ее максимального значения (время контакта зуба с заготовкой для фрезы с шагом  $t_z = 12,6$  мм равно  $13 \cdot 10^{-4}$  с).

При увеличении шага зубьев  $t_z$  с 10 до 15 мм (на 50 %) максимальная глубина внедрения зуба в заготовку  $a_{m,max}$  увеличивается также на 50 % (табл. 2).

Период времени между контактами с заготовкой последовательно работающих зубьев увеличился на 85 %. Это является причиной того, что поверхностные слои заготовки в перерыве между работой зубьев успевают остыть в большей степени, поэтому температура деформируемого слоя заготовки  $T_g$  снижается с 412 до 391 К. Согласно зависимости (4) с уменьшением  $T_g$  увеличивается напряжение текучести  $\sigma_{S_1}$ , что приводит к росту главной составляющей силы резания  $P_z$  и силы трения  $F_1$  – на 21 и 49 % соответственно. Увеличение сил  $P_z$  и  $F_1$  происходит вследствие изменения глубины внедрения зуба в заготовку  $a_m$  (2) и (5). Сила трения задней поверхности зуба о заготовку  $F_2$  изменяется незначительно (на 1 %).

2. Зависимость геометрических параметров среза и сил резания от шага зубьев фрезы:  $\tau = 12,5 \cdot 10^{-4}$  с

Шаг зубьев $t_z$ , мм	Максимальная глубина внедрения зуба в заготовку $a_{m, \max}$ , мкм	Время между контактом с заготовкой последовательно работающих зубьев, с	Длина контакта стружки с заготовкой $l_1$ , мкм	Температура деформируемого слоя заготовки $T_g$ , К	Составляющая силы резания $P_z$ , Н	Силы трения, Н	
						стружки о переднюю поверхность зуба $F_1$	задней поверхности зуба о заготовку $F_2$
10	24,2	$1,95 \cdot 10^{-3}$	57,6	412,0	84,4	29,3	50,5
12,6	30,5	$2,79 \cdot 10^{-3}$	72,0	402,5	93,4	36,8	50,8
15	36,3	$3,61 \cdot 10^{-3}$	84,8	391,0	101,8	43,6	51,1

Согласно зависимости (1) с увеличением сил увеличиваются мощности источников тепловыделения в зоне контакта стружки с зубом  $W_1$  и в зоне деформирования  $W_g$  – на 50 %

(табл. 3). При этом мощность теплового источника в зоне контакта зуба с заготовкой  $W_2$  изменяется незначительно.

3. Зависимость мощностей источников тепловыделения и температур от шага зубьев фрезы:  $\tau = 12,5 \cdot 10^{-4}$  с

Шаг зубьев $t_z$ , мм	Мощности источников тепловыделения, Вт			Средняя температура, К в зонах контакта		Максимальная температура, К в зонах контакта		Температура заготовки, К, на глубине	
	в зоне контакта зуба со стружкой $W_1$	в зоне контакта зуба с заготовкой $W_2$	в зоне деформирования $W_g$	зуба со стружкой, $T_1$	зуба с заготовкой, $T_2$	зуба со стружкой, $T_{1 \max}$	зуба с заготовкой, $T_{2 \max}$	25 мкм	370 мкм
10	44,0	151,4	57,8	842	902,9	883	1245	576	470
12,6	55,2	152,3	72,7	867	916,0	1088	1281	563	465
15	65,4	153,4	86,5	882	871,0	1112	1267	540	450

Увеличение мощностей источников тепловыделения приводит к увеличению средней температуры в зоне контакта зуба со стружкой  $T_1$  на 5 % и максимальной температуры  $T_{1 \max}$  в этой зоне на 26 % (см. табл. 3).

Температура в зоне контакта зуба с заготовкой  $T_2$  определяется, главным образом, мощностью источника  $W_2$ , которая с увеличением шага изменяется незначительно. Средняя  $T_2$  и максимальная  $T_{2 \max}$  температуры в этой зоне с увеличением шага  $t_z$  с 10 до 12,6 мм незначительно увеличиваются, а при увеличении шага с 12,6 до 15 мм снижаются. Поэтому влияние шага на температуру в зоне контакта зуба с заготовкой не подчиняется видимой закономерности.

Температура на глубине 25 мкм в поверхностных слоях заготовки с увеличением шага снижается на 7 % и в меньшей степени снижается температура на глубине 370 мкм – на 5 %.

**Выводы**

1. В результате численного моделирования установлено, что с увеличением времени  $\tau$  контакта зуба фрезы с заготовкой увеличиваются глубина внедрения зуба в заготовку  $a_m$ , главная составляющая силы резания  $P_z$  и сила трения стружки о переднюю поверхность зуба  $F_1$ .

Средние температуры в зонах контакта зуба со стружкой  $T_1$  и в зоне контакта зуба с заготовкой  $T_2$  с увеличением времени  $\tau$  увеличиваются на 12 и 29 % соответственно.

2. При увеличении на 50 % шага зубьев  $t_z$  увеличиваются главная составляющая силы резания  $P_z$  на 21 %, сила трения  $F_1$  на 49 % и мощности источников тепловыделения в зоне контакта зуба со стружкой  $W_1$  и в зоне деформирования  $W_g$  на 50 %. Увеличение мощностей источников тепловыделения является причиной увеличения максимальной температуры  $T_{1 \max}$  в зоне контакта стружки с зубом на 26 %, при этом средняя температура в этой зоне увеличивается незначительно.

3. С увеличением шага зубьев температура в поверхностных слоях заготовки на глубине 25 мкм снижается на 7 %.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Khramov, A.V. Improving the performance of the processing of deep holes by improving the structure of the boring tool // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 709 044068. Vol. 3.
2. Особенности импортозамещения металлорежущего инструмента в современных условиях / А.В. Храмов, Е.Н. Лексин, И.В. Семдянкин, М.В. Назаров, Е.С. Киселев // СТИН, 2016. – №1. – С. 21-26.
3. Резников, А.Н., Резников, Л.А. Тепловые про-

цессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

4. Унянин, А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 220-235.

5. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

6. Воронцов, А.Л., Султан-Заде, Н.М., Албагачиев, А.Ю. Разработка новой теории резания. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 56-61.

7. Ящерицын, П.И., Фельдштейн, Е.Э., Корниевич, М.А. Теория резания: учебник. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.

8. Unyanin A.N., Khusainov A.S. The ultrasonic grinding process temperature field study // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129.

9. Справочник инструментальщика / И.А. Ординартцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др. / Под общ. ред. И.А. Ординартцева. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987. – 846.

10. Воронцов, А.Л., Султан-Заде, Н.М., Албагачиев, А.Ю. Разработка новой теории резания. Практические расчеты параметров резания при точении // Вестник машиностроения. – 2008. – № 9. – С. 67-70.

## REFERENCES

1. Khramov A.V. Improving the performance of the processing of deep holes by improving the structure of the

boring tool. «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering». Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 709 044068. Vol. 3. 2019.

2. Features of import substitution of metal-cutting tools in modern conditions / A.V. Khramov, E.N. Leksin, I.V. Semdyankin, M.V. Nazarov, E.S. Kiselyov // STIN. 2016. no.1. pp. 21-26.

3. Reznikov A.N., Reznikov L.A. Thermal processes in technological systems. М.: Mashinostroenie. 1990. 288 p.

4. Unyanin A.N. Analytical study of the temperature field during milling with the imposition of ultrasonic vibrations // Bulletin of the P.A. Solovyov Russian State Technical University. 2017. № 2 (41). pp. 220-235.

5. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of metal cutting. М.: Mashinostroenie. 1975. 344 p.

6. Vorontsov A.L., Sultan-Zadeh N.M., Albagachiev A.Y. Development of a new cutting theory. Mathematical description of chip formation of different types, pulsation of cutting forces and contact parameters of the processed surface of the workpiece with the back surface of the cutter // Bulletin of Mechanical Engineering. 2008. No. 7. pp. 56-61.

7. Lizardsyn, P.I. Feldstein E.E., Kornievich M.A. Theory of cutting: textbook. Minsk: Novoe znanie. 2006. 512 p.

8. Unyanin A.N., Khusainov A.S. The ultrasonic grinding process temperature field study // MATEC Web of Conferences. Vol. 129. 2017.

9. Handbook of the toolmaker / I.A. Ordinarartsev, G.V. Filippov, A.N. Shevchenko, etc. / Under the general editorship of I. A. Ordinarartseva. – L.: Mechanical engineering, Leningrad Department. 1987. 846.

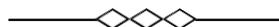
10. Vorontsov A.L., Sultan-Zadeh N.M., Albagachiev A.Y. Development of a new cutting theory. Practical calculations of cutting parameters during turning // Bulletin of Mechanical Engineering. 2008. No. 9. pp. 67-70..

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

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

Статья поступила в редакцию 20.09.2022; одобрена после рецензирования 07.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

The article was submitted 20.09.2022; approved after reviewing 07.10.2022; assepted for publication 14.10.2022.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №12 (138). С. 27-32.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 27-32.

Научная статья  
УДК 621.7  
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-27-32

## Методика изучения вибрационных процессов при фрезеровании

Александра Анатольевна Губанова<sup>✉</sup>, к.т.н.  
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия  
anatoliya81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9785-5384>

**Аннотация.** Представлен измерительный комплекс для оценки вибраций на металлорежущих станках фрезерной группы. Предложено экспериментальное изучение вибрационной активности процесса фрезерования концевыми фрезами, которое реализует алгоритмы преобразования колебательных ускорений в колебательные смещения. В частности, показано, что значения случайных величин из таких последовательностей способствует идентификацию стационарных траекторий упругих деформационных смещений фрезы относительно обрабатываемой детали.

**Ключевые слова:** фрезерная обработка, виброускорения, вибросмещения, скорость резания, частота вращения

**Для цитирования:** Губанова А.А. Методика изучения вибрационных процессов при фрезеровании // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 27-32. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-27-32.

Original article

## Methodology for the study of vibration processes in milling operations

Alexandra A. Gubanova, Can.Sc.Tech.  
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia  
anatoliya81@mail.ru

**Abstract.** The paper presents a measurement package for evaluating vibrations of metal-cutting machines of milling system. It has been suggested to conduct an experimental study of the vibrational activity in end milling turning algorithms for converting oscillatory accelerations into vibrational displacements. In particular, it is shown that the values of random variables from such sequences contribute to the identification of stationary trajectories of rotary tool elastic deformation displacements against the workpiece.

**Keywords:** milling, vibration acceleration, vibration displacement, surface foxtail, angular velocity

**For citation:** Gubanova A. A. Methodology for the study of vibration processes in milling operations. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 27-32. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-27-32.

### Введение

В настоящее время существует обширная номенклатура особо ответственных деталей сложной геометрической формы (автомобильная; авиакосмическая промышленность; железнодорожный транспорт и др.), к которым вносятся жёсткие требования по многим параметрам, в том числе, по качеству обрабатываемой поверхности. К таким параметрам можно отнести геометрическую точность, шероховатость и волнистость обработанной детали. Из [1 – 5] известно, что вышеуказанные параметры напрямую зависят от динамических свойств процесса фрезерования.

Известно, что процесс фрезерования – нестационарный, обусловлено это особенностью режущего инструмента. Процесс фрезерования с точки зрения математического описания представляет собой нелинейные уравнения с постоянно изменяющимися коэффициентами по причине прерывистости процесса резания зубьями фрезы. При этом возникающие вибрации не просты в анализе. В окрестности стационарной периодической траектории, в зависимости от условий, формируются различные инвариантные предельные множества – предельные циклы, инвариантные торы, хаотические аттракторы. Последние существенно

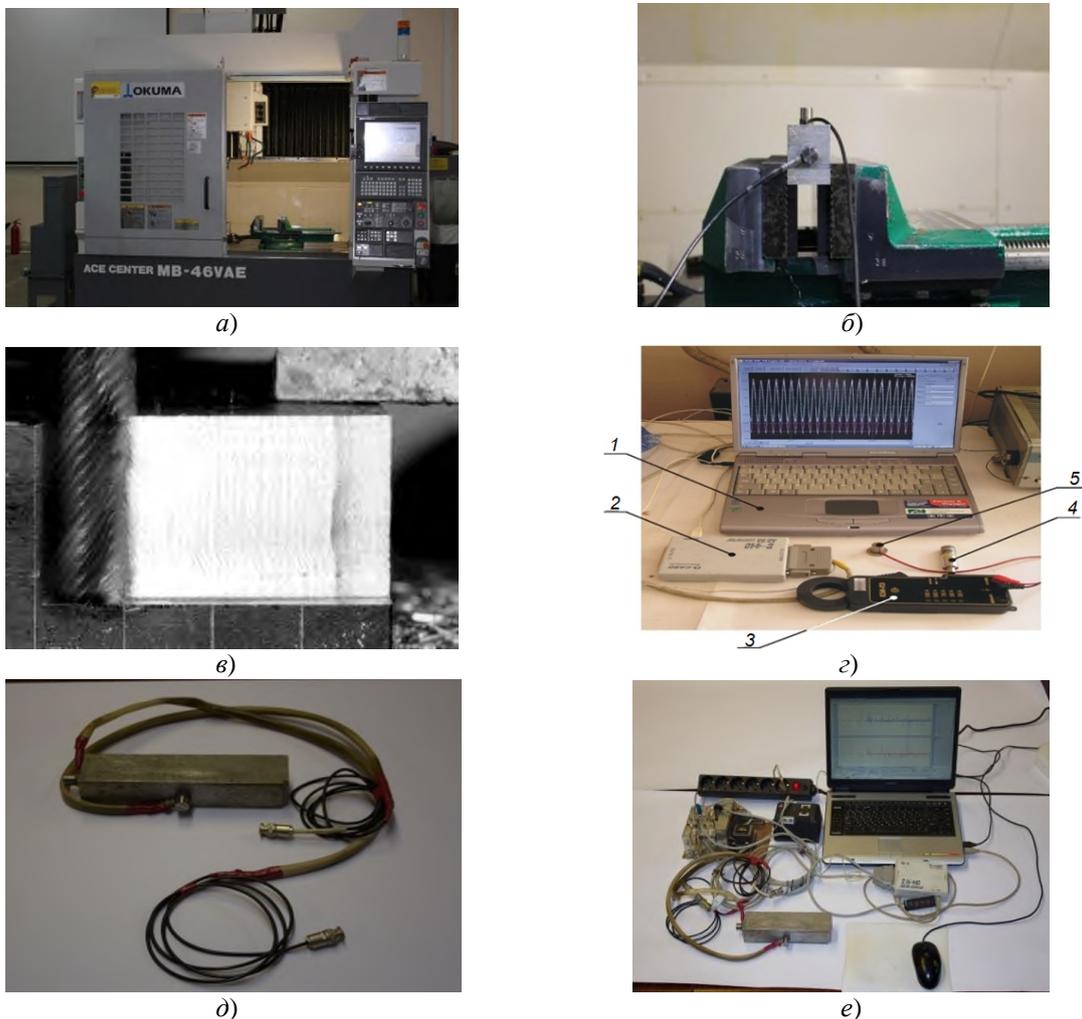
вливают на формируемый рельеф поверхности будущей детали, а следовательно, и на долговечность изделий.

Кроме указанного, вибрации при фрезеровании возникают по причине внешних возмущений: увеличения подачи, увеличения ширины среза, изменения скорости движения исполнительных элементов станка, радиальных биений шпинделя, износа режущего инструмента и др. Формирование всех вышеуказанных факторов позволяет производить сложные нелинейные наложения периодического изменения толщины срезаемого слоя, которое формирует стационарную траекторию деформационных смещений [6 – 10], что существенно влияет на конечный итог обработки.

### Методика исследования

В данной работе серия проведённых экспериментов выполнялась для объективного рассмотрения влияния вибраций на обрабатываемую заготовку и инструмент, за счёт измерения общего шума, который генерирует процесс резания. В ходе работы учитывались, не только параметры вибраций, но и идентифицировались основные параметры динамической характеристики процесса резания.

Апробация осуществлялась на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре MB-46VAE (рис. 1, а). Обрабатывалась заготовка, на которой предварительно были распределены виброакселерометры, способные фиксировать виброускорения в частотном диапазоне от 10,0 Гц до 10,0 кГц (рис. 1, б).



**Рис. 1. Проведение эксперимента на обрабатывающем центре MB-46VAE:**

а – внешний вид обрабатывающего центра; б – заготовка с датчиками на столе станка; в – процесс фрезерования заготовки; г – измерительный интерфейс; д – заготовка с расположенными датчиками; е – настройка измерительного интерфейса; 1 – персональный компьютер (ПК); 2 – плату сопряжения с ПК; 3 – токоизмерительные клещи; 4 – интегратор для виброакселерометра; 5 – виброакселерометр

Для регистрации вибросмещений фрезы применялся токовихревой бесконтактный датчик с параметрами чувствительности при измерении расстояния между устройством и изме-

ряемой поверхностью – 5,0 мВ/мкм и диапазоном измерения – 2,5 мм, порогом чувствительности 1 мкм. Погрешность при этом составляла не выше 0,2 мкм.

Оценку виброакустического шума фиксировал измерительный микрофон NTIDL1, с ра-

бочим диапазоном преобразования от 25,0 Гц до 10,0 кГц (рис. 2, б).



Рис. 2. Установленные измерительные преобразователи для определения:  
а – колебаний инструмента; б – шума процесса резания

Измерения угловых перемещений шпинделя осуществлялись с использованием оптического цифрового измерительного устройства. Крутящий момент измерялся по величине мощности асинхронного двигателя шпинделя, которое рассчитывалось с помощью операции скалярного перемножения тока двигателя и напряжения. Измерение тока фиксировали измерительные клещи. Для передачи полученных сигналов в ПК применялся модуль АЦП Е14-440, представляющий собой внешнее устройство, подключённое к ПК через разъём USB. Все полученные данные по специальным алгоритмам в памяти ПК обрабатывались программными методами, в частности, использо-

вались методы экспериментальной динамики. В ходе работы также применяли виброударные молотки со встроенным датчиком силы и усилителями заряда.

### Результаты эксперимента

Рассмотрим принцип преобразования колебательных ускорений в колебательные смещения. На рис. 3 представлены временные последовательности виброускорений при обработке фрезой ( $\varnothing 40,0$  мм) латунной заготовки, при следующих значениях: величина подачи на зуб – 0,1 мм; скорость резания – 225,0 м/мин; ширина заготовки  $b = 25$  мм; угловая скорость вращения шпинделя – 1800 об/мин.

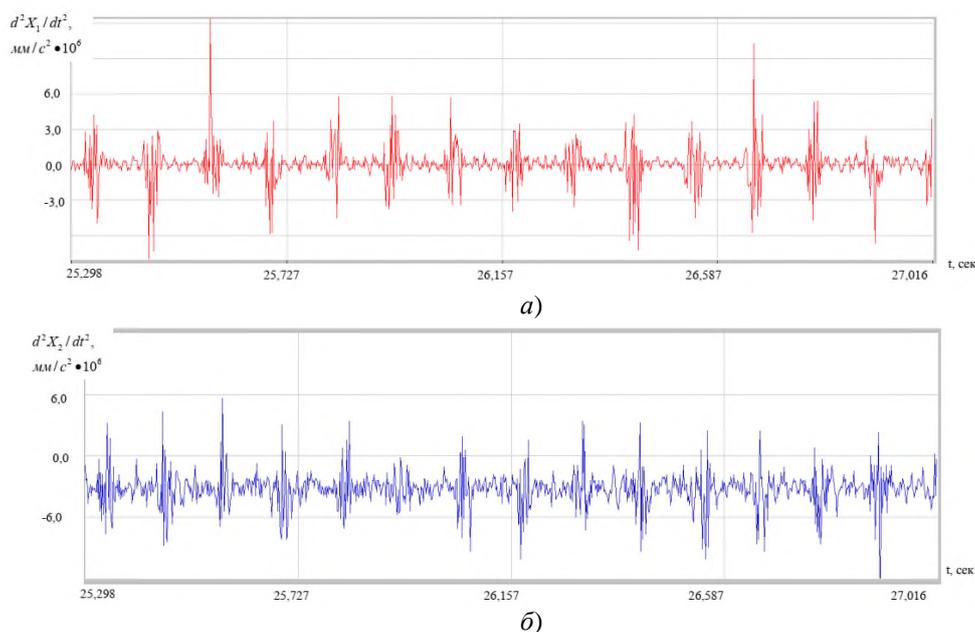


Рис. 3. Виброускорения при фрезеровании:

а – виброускорения, полученные в направлении, нормальном к поверхности резания; б – виброускорения, полученные в тангенциальном направлении

По графикам видно, что полученные колебания по двум ортогональным направлениям взаимосвязаны между собой. Это говорит о том, что для исследования природы вибраций целесообразно использовать пространственные динамические модели.

Имеющиеся значения виброускорений с помощью операции двойного интегрирования преобразовывались в вибросмещения, при этом производилась процедура удаления трендов, которые неизбежны при цифровом интегрировании. Видно из ранее представленного, что

процесс периодический и периоды виброускорений, виброскоростей и вибросмещений равны между собой. Для определения тренда использовалась операция вычисления скользящего среднего, хорошо раскрытая в работе [11], поэтому, не останавливаясь на этом, перейдем к рассмотрению примеров преобразования виброускорений в виброскорости и вибросмещения. Приведем примеры преобразования виброускорений в виброскорости и вибросмещения (рис. 4, рис. 5).

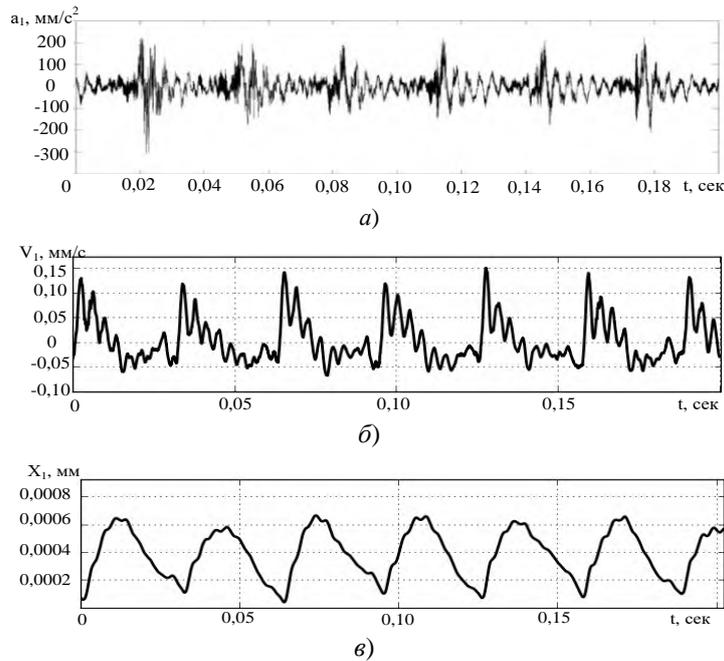


Рис. 4. Преобразование виброускорений в вибросмещения (направление  $X_1$ ):  
а – график ускорения; б – график скорости; в – график перемещения

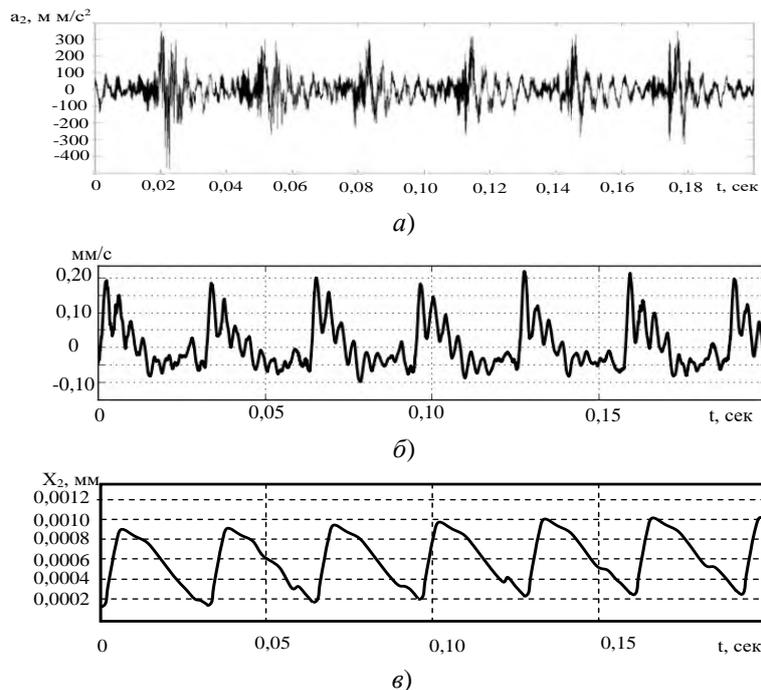


Рис. 5. Преобразование виброускорений в вибросмещения (направление  $X_2$ ):  
а – график ускорения; б – график скорости; в – график перемещения

Рассмотрим типовые траектории изменения деформационных смещений в направлении  $X_2$  (рис. 6) по мере увеличения частоты шпинделя. Частота увеличивается со 100 об/мин до 1200 об/мин. Скорость резания изменялась со-

ответственно в диапазоне: 12,5...150 м/мин. Обрабатываемый материал – 40ХН2МА. Материал инструмента – Р9К5. Ширина фрезеруемой поверхности – 10 мм.

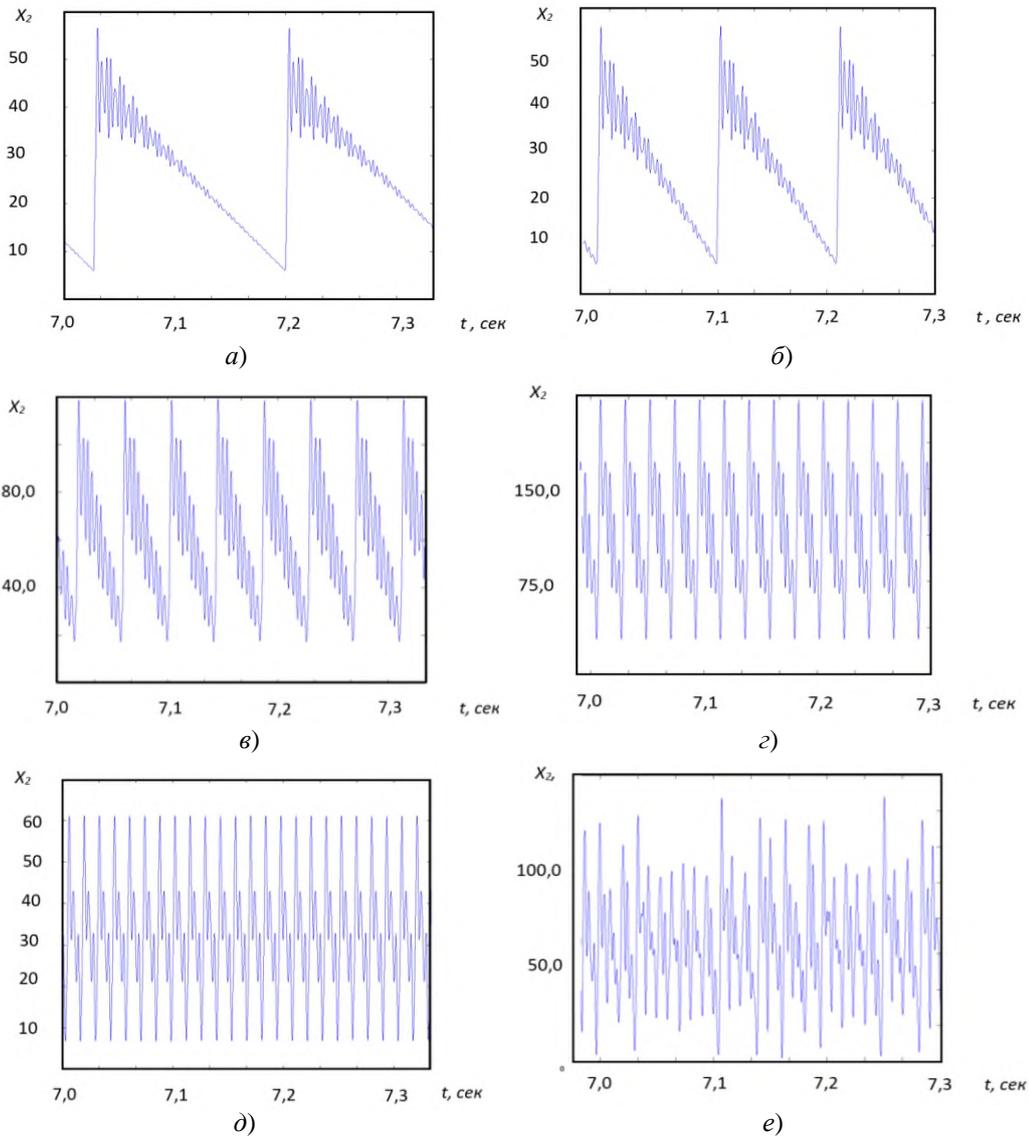


Рис. 6. Изменение установившихся вибрационных смещений в направлении  $X_2$  при вариации частоты вращения шпинделя:

*a* – при 100 об/мин; *б* – 150 об/мин; *в* – 400 об/мин; *г* – 600 об/мин; *д* – 1000 об/мин; *е* – 1200 об/мин

### Заключение

Исходя из представленного, можно констатировать выявленные особенности динамической системы фрезерования:

1. При малых скоростях совпадают периодически изменяющиеся временные зависимости. Видно, что период их характеризуется временем между двумя последовательными контактами режущих лезвий.

2. При высоких скоростях постоянные колебания превращаются в беспорядочные,

наблюдается рост амплитуды. Замечено, что установленный диапазон 80...110 м/мин более устойчив и позволяет снизить вибрации.

3. Из представленных данных видно, что на однообразные траектории изменения деформационных смещений наложены периодические колебания, которые могут позиционировать себя как затухающие (рис. 6, *a*, *б*), незатухающие (рис. 6, *г*, *д*) и как хаотические колебания (рис. 6, *е*).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Заковоротный, В., Губанова, А., Христофорова, В.** Бифуркации стационарных многообразий, формируемых в окрестности равновесия в динамической системе резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – №1 (80). – С. 11-22.
2. **Заковоротный, В., Губанова, А., Христофорова, В.** Один случай формирования хаотических аттракторов в динамической системе резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – №2 (81). – С. 11-21.
3. **Заковоротный, В., Фам, Д., Нгуен, Т.** Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистемы инструмента и заготовки // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 38-46.
4. **Заковоротный, В., Фам, Д., Нгуен, С.** Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении // Вестник Донского государственного технического университета. – 2010. – №7 (50). – С. 1005-1015.
5. **Заковоротный, В., Флек, М., Фам, Д.** Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – №10 (61). – С. 1785-1797.
6. **Воронов, С., Киселев, И., Аршинов, С.** Методика применения численного моделирования динамики многокоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей при проектировании технологического процесса // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. – Спец. Вып. №6. – С. 50-69.
7. **Воронов, С., Непочатов, А., Киселев, И.** Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 2011. – №1 (610). – С. 50-62.
8. **Заковоротный, В.Л.** Управляемая эволюция динамической системы, взаимодействующей со средой // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – №6 (61). – С. 84-103.
9. **Заковоротный, В., Фам, Д.** Перестройка динамической системы, взаимодействующей с процессом резания, в ходе ее эволюции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 49-61.
10. **Заковоротный, В., Ладник, И.** Построение информационной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – № 4. – С. 75.

11. **Gubanov A., Kustikov D.** Methods of experimental study of vibrational sequences during milling// XV International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems», DTS 2019. 2019

## REFERENCES

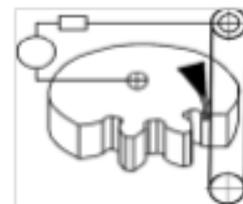
1. Zakovorotny V., Gubanov A., Khristoforova V. Bifurcations of stationary manifolds formed in the neighborhood of equilibrium in the dynamic cutting system. Bulletin of the Don State Technical University, 2015, no. 1(80), pp. 11-22.
2. Zakovorotny V., Gubanov A., Khristoforova V. An example of chaotic attractors formation in a dynamic cutting system. Bulletin of the Don State Technical University, 2015, no. 2 (81), pp. 11-21.
3. Zakovorotny V., Vam D., Nguyen T. Mathematical modeling and parametric identification of dynamic properties of partial system of the tool and rough piece/ Izvestiya of higher educational institutions. The North Caucasus region. Issue: Technical Sciences, 2011, no. 2, pp. 38-46.
4. Zakovorotny V., Vam D., Nguyen S. Modeling of deformation displacements of the tool against rough piece in turning/ Bulletin of the Don State Technical University, 2010, no. 7 (50), pp. 1005-1015.
5. Zakovorotny V., Fleck M., Pham D. Synergetic concept in the construction of precision control systems for manufacturing parts of complex geometric shape/ Bulletin of the Don State Technical University, 2011, no. 10, (61), pp. 1785-1797.
6. Voronov S., Kiselev I., Arshinov S. The method of numerical simulation of the dynamics of multi-coordinate milling of complex-profile parts in the process design/ Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mashinostroenie, 2012, Special Issue, no. 6, pp. 50-69.
7. Voronov S., Nepochatov A., Kiselev I. Stability criteria evaluation process of milling of non-rigid parts. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie, 2011, no. 1, pp. 50-62.
8. Zakovorotny V.L. Controlled evolution of dynamic systems interacting with medium./ Izvestiya SFU. Technical sciences, 2006, no. 6 (61), pp. 84-103.
9. Zakovorotny V., Vam D. Restructuring of the dynamic system interacting with the cutting process during its evolution / Izvestia SFU. Technical sciences, 2011, no. 6 (119), pp. 49-61.
10. Zakovorotny V., Lednik I. Information modelling of a dynamic system of a metal-cutting machine for the diagnosis of the machining process/ Problems of machine-building and machine reliability, 1991, no. 4, p. 75.
11. Gubanov A., Kustikov D. Methods of experimental study of vibrational sequences during milling// XV International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems», DTS 2019. 2019.

**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 10.09.2022; одобрена после рецензирования 22.09.2022; принята к публикации 30.09.2022.

The article was submitted 10.09.2022; approved after reviewing 22.09.2022; assepted for publication 30.09.2022.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №12 (138). С. 33-37.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 33-37.

Научная статья  
УДК 534-8, 621.9.048.6  
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-33-37

### Применение ультразвуковых технологий при получении заклёпочных соединений

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

**Аннотация.** Приведен обзор современного состояния исследований по применению ультразвуковых колебаний в процессе получения заклёпочных соединений. Рассмотрены различные варианты использования ультразвука для деформации заклёпки: применение излучателя в качестве деформирующего инструмента, применение промежуточного деформирующего элемента, использование подпружиненного основания, наложение колебаний на соединяемые детали.

**Ключевые слова:** ультразвук, колебания, деформация, заклёпка

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00185, <https://rscf.ru/project/21-79-00185/>.

**Для цитирования:** Сундуков С.К. Применение ультразвуковых технологий при получении заклёпочных соединений // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 33-37. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-33-37.

Original article

### Application of ultrasonic technologies in riveted joints manufacturing

Sergey K. Sundukov, Can.Sc.Tech.  
Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia  
sergey-lefmo@yandex.ru

**Abstract.** The present state research overview on the use of ultrasonic vibrations in the riveted joints manufacturing is given. Various options for using ultrasonics for rivet deformation are viewed: the use of projectors as a deforming tool, the use of an interposed deformation element, the use of a spring-assisted base and oscillation superposition for jointed parts.

**Keywords:** ultrasonics, oscillations, deformation, rivet

**Acknowledgments:** the research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 21-79-00185, <https://rscf.ru/project/21-79-00185/>.

**For citation:** Sundukov S.K. Application of ultrasonic technologies in riveted joints manufacturing. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 33-37. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-33-37.

#### Введение

Заклёпочные соединения играют важную роль в конструкциях различных узлов машиностроения. Они применяются для получения

неразъёмных соединений, состоящих из различных материалов, и в случаях, когда соединяемые детали не могут быть соединены сваркой.

Основной проблемой существующих процессов клёпки является то, что для деформирования заклёпки требуется применение механического воздействия, в зависимости от которого соединение может образовываться прессовым или ударным способом. При этом давление, прикладываемое к заклёпке должно быть выше предела текучести материала, из которого она изготовлена. В результате клёпка не может применяться для хрупких и полимерных материалов.

Другой важной проблемой является характер деформации заклёпки при прессовом или ударном способе. Так механическая энергия затрачивается в основном на формирование замыкающей головки, в то время как стержень заклёпки приобретает форму «бочки». Неполное заполнения зазора между стержнем и установочным отверстием приводит к неравномерному распределению радиальных напряжений, что приводит к снижению прочности соединения.

Таким образом, основным направлением интенсификации процесса клёпки является снижение усилия, требуемого для деформации заклёпки, при одновременном обеспечении более полного заполнения установочного зазора.

Для решения этих вопросов эффективным способом является применение ультразвуковых колебаний.

Известно, что деформация в ультразвуковом поле характеризуется снижением пластичности деформируемого металла, вследствие поглощения акустической энергии дефектами кристаллической решётки. Данный факт позволяет значительно снизить требуемое усилие клёпки и изменить характер деформации заклёпки.

Данная работа является обзором научных трудов и патентов по применению ультразвуковых колебаний в процессе получения заклёпочных соединений.

### Способы клёпки с применением ультразвуковых колебаний

Первые исследования по применению ультразвуковых колебаний для получения заклёпочного соединения были проведены фирмой «Боинг» [1]. Для деформирования заклёпки, изготовленной из алюминиевого сплава, использовалась ультразвуковая стержневая пьезокерамическая колебательная система, ре-

зонансная частота работы которой составляла 10 000 Гц. В качестве инструмента использовался промежуточный элемент, не имеющий жёсткой связи с излучающей поверхностью колебательной системы (рис. 1).

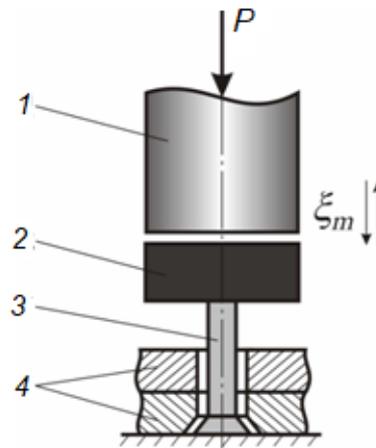


Рис. 1. Схема клёпки с промежуточным деформирующим элементом:

1 – излучатель; 2 – промежуточный элемент; 3 – заклёпка; 4 – соединяемые пластины

Промежуточный деформирующий элемент имеет частоту колебаний в несколько раз меньше колебательной системы и составляет порядка 3000 Гц, но при этом имеет большую амплитуду колебаний  $\xi_m$ . В результате использования такой схемы позволяет значительно повысить ударное воздействие, оказываемое на заклёпку.

Исследования показали повышение качества заклёпочного соединения при одновременном снижении статической нагрузки, необходимой для деформации заклёпки. Также в данной работе предполагается возможность применения данного метода для получения соединений с титановыми заклёпками.

К минусам способа можно отнести высокий уровень шума при использованной частоте 10 000 Гц, а также использование пьезокерамического преобразователя, эффективность которого снижается с приложением к нему усилия.

В исследовании [2] проводилось сравнение трёх различных схем ультразвукового деформирования заклёпки. Исследования проводились на макете ультразвукового пресса, резонансная частота которого составляла 18 600 Гц, а акустическая мощность 1 кВт. В качестве образцов использовались заклёпки с диаметром стержня 3 мм, изготовленные из сплава Д1 и стали 20.

В первой схеме деформирующим элементом являлся излучатель колебательной системы, который прижимался к заклёпке с усилием  $P$ . Заклёпка устанавливалась на массивную опору.

Во второй схеме также деформирующим элементом является излучатель, но установка заклёпки осуществлялась на акустическую развязку, представляющую собой волновод с резонансными размерами, соответствующими

излучателю. При этом сам волновод опирается на стакан в месте нуля колебаний. Таким образом, данная схема обеспечивает повышение эффективности передачи колебаний.

Третья схема аналогична предложенной на рис. 1 и предусматривает использование промежуточного деформирующего элемента.

В результате исследований получены зависимости усилия деформирования от амплитуды колебаний излучателя (рис. 2).

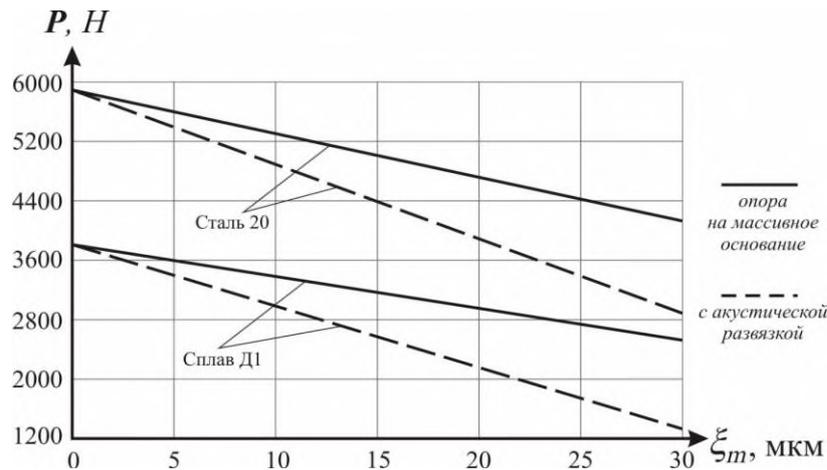


Рис. 2. Зависимость усилия деформирования от амплитуды колебаний

Ультразвуковые колебания приводят к снижению усилия деформации до 1,5 раз по первой схеме и до 2,5 по схеме с акустической развязкой. Несмотря на линейную зависимость снижения усилия от амплитуды колебаний торца излучателя, результаты объясняются не увеличением динамического воздействия, а изменением пластичности материала при наложении ультразвука.

Использование схемы с применением промежуточного деформирующего элемента приводит к снижению усилия клёпки до 75 – 100 раз по сравнению с прессовым методом ( $\xi_m = 0$ ). При этом величина усилия в зависимости от амплитуды изменяется незначительно и колеблется в пределах 60 – 120 Н. Отсюда сделан вывод, что процесс клёпки в данном случае определяется режимом колебаний промежуточного элемента.

При этом повышении амплитуды оказывает значительное влияние на время формирования замыкающей головки, которое снижается с 44 с при 10 мкм до 1 с при 30 мкм.

Повышение прочности полученных соединений на разрыв составило порядка 10 %.

В работе [3] и патенте [4] предложен прин-

цип ультразвуковой клёпки, отличающийся от других тем, что заклёпка устанавливается на подпружиненное основание (рис. 3).

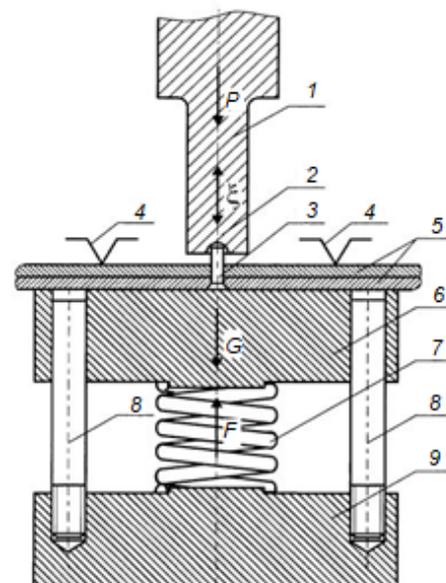


Рис. 3. Способ клёпки с установкой заклёпки на подпружиненное основание:

1 – ультразвуковой излучатель; 2 – профилированная обжимка; 3 – заклёпка; 4 – прижим; 5 – соединяемые пластины; 6 – упор; 7 – пружина; 8 – направляющие; 9 – основание

При реализации данной схемы частота колебаний подпружиненного основания существенно ниже, чем у торца излучателя, при этом значительно выше амплитуда колебаний, что приводит к повышению ударного импульса в момент контакта. То есть достигается эффект аналогичный использованию промежуточного деформирующего элемента.

В данной схеме упрочняющим инструментом является излучатель, а усилие прижима регулируется по сжатию пружины. Реализация данной схемы осуществлять выбор оптимальных акустико-технологических параметров обработки, обеспечивающих максимальное снижение пластичности деформируемого материала.

Экспериментальные исследования клепки по представленной схеме проведены в работе [5].

Использование высокоскоростной видеосъёмки позволило установить зависимости скорости и времени деформации заклёпки при частоте колебаний излучателя 22 кГц и варьировании амплитуды от 3 до 25 мкм. В качестве образца использовалась алюминиевая заклёпка. При амплитудах до 4 мкм не происходило отрыва заклёпки от излучателя, заклёпка колебалась с ультразвуковой частотой без деформации. С увеличением амплитуды до 8...10 мкм происходит значительный рост ударного воздействия, а при дальнейшем увеличении роста практически не происходит.

В результате различных комбинаций амплитуды и усилий прижима выбрана оптимальная, который составляет 40...50 Н при амплитуде 10 мкм. Время формирования замыкающей головки при этом составило порядка 9 с.

Прочность полученного соединения на срез выросла до 20 %. Это объясняется тем, что при малых скоростях деформации (по сравнению с другими способами) изменяется её характер, происходит более полное заполнение зазора между установочным отверстием и стержнем заклёпки, повышается равномерность распределения замыкающих напряжений.

В качестве реализации данного способа авторами [6] предлагается конструкция с подпружиниванием колебательной системы (рис. 4).

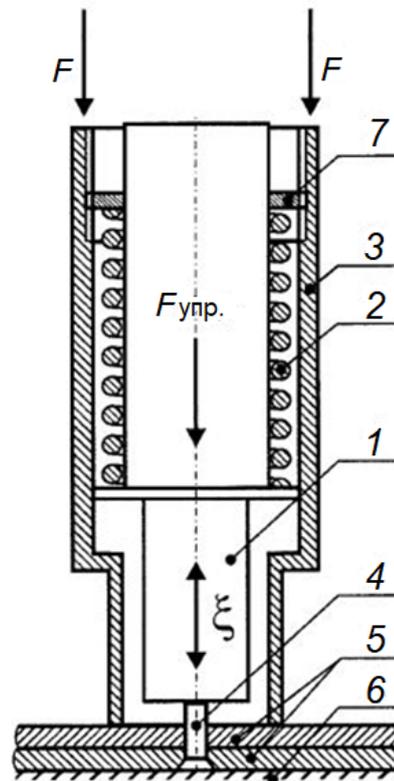


Рис. 6. Схема наложения колебаний при соединении самопробивающейся заклёпки:

1 – пуансон; 2 – заклёпка; 3 – соединяемые листы металла; 4 – матрица; 5 – ультразвуковой излучатель

Суть способа заключается в наложении колебаний ультразвуковой частоты на соединяемые пластины. Для этого матрица является частью колебательной системы и является излучателем. В результате акустопластического эффекта прочность соединяемого материала падает, а пластичность возрастает, что позволяет использовать предлагаемый способ для соединений из прочных материалов или для соединения толстолистовых элементов.

Под действием колебаний в деформируемом материале возникает акустопластический эффект, который временно снижает его прочность и придаёт повышенную пластичность, за счёт чего данный метод позволяет повысить толщину соединяемых листов.

### Заключение

Применение ультразвуковых колебаний для совершенствования процессов получения заклёпочных соединений основано на эффекте снижения пластичности материала, находящегося в ультразвуковом поле.

Результаты исследований во всех случаях

свидетельствуют о значительном снижении усилия клёпки, что позволяет обеспечить соединения хрупких материалов.

Одним из важных моментов является изменение характера деформации заклёпки, что приводит к более полному заполнению зазору между установочным отверстием и стержнем заклёпки, в результате чего увеличивается прочность получаемого заклёпочного соединения.

Несмотря на положительные результаты исследований, данная технология не получила широкого распространения, о чём говорит низкая публикационная активность по этой теме.

Сложности применения ультразвука связаны в основном с разным влиянием ультразвука на пластичность различных материалов, что требует большого объёма исследований и оптимизации оптимальных акустико-технологических параметров обработки.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Charles C. Libby. Sonic Riveting of Aircraft Aluminum Alloys // Jeer transactions on sonics and ultrasonics. 1969. № 3. vol. SU-16.
2. Горбунов, А.А., Салтанов, В.М., Захаров, В.В. Клепка деталей с воздействием ультразвуковых колебаний // Исследования станков и инструментов для обработки сложных и точных поверхностей: Межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1993. – С. 33-42.
3. Improving Rivet Performance by Ultrasonic Shock Treatment / Fatyukhin, D.S., Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K. et. al. // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39. Issue 8. P. 703-704.
4. Технологический процесс получения заклёпочного соединения с помощью ультразвукового ударного воздействия / Д.С. Фатюхин, Р.И. Нигметзянов, С.К. Сундуков и др. // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – №6 (96). – С. 17-21.
5. Кузнецов, С.Ю., Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Патент № 2705840 С1 Российская Федерация, МПК В21J 15/02. Способ клёпки: № 2018123811; заявл. 29.06.2018; опубл. 12.11.2019.
6. Динамика деформации заклёпки при ультразвуковом ударном воздействии / Д.С. Фатюхин, Л.Н. Бритвин, С.Ю. Кузнецов и др. // Вестник Московского авто-

мобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2018. – №4 (55). – С. 17-21.

7. Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С., Кузнецов, С.Ю. Патент на полезную модель № 199610 U1 Российская Федерация, МПК В21J 15/12. Устройство для клёпки: № 2020100850; заявл. 14.01.2020; опубл. 09.09.2020

8. Chin H. Toh. Ultrasonic riveting tool and method. Patent № US 9321099 B1 Apr. 26, 2016.

9. Clarke, C.J., Doo R.S., Lucas M., Trinick R.J. Joining apparatus and method. Patent № US 2011/0126396 A1 Jun. 2, 2011.

### REFERENCES

1. Charles C. Libby. Sonic Riveting of Aircraft Aluminum Alloys // Jeer transactions on sonics and ultrasonics, 1969. № 3. vol. SU-16.
2. Gorbunov A.A., Saltanov V.M., Zakharov V.V. Riveting of parts with the influence of ultrasonic vibrations // Studies of machine tools and tools for processing complex and precise surfaces: Inter-university. Scientific Collection – Saratov: SSTU, 1993. pp. 33-42.
3. Improving Rivet Performance by Ultrasonic Shock Treatment / Fatyukhin, D.S., Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K. et. al. // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39. Issue 8. P. 703-704.
4. The technological process of obtaining a rivet joint using ultrasonic impact / D. S. Fatyukhin, R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov [et al.] // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2019. №6 (96). p. 17-21.
5. S. Yu. Kuznetsov, R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov, D. S. Fatyukhin. Patent No. 2705840 C1 Russian Federation, MPK B21J 15/02. Riveting method: No. 2018123811; application 29.06.2018; publ. 12.11.2019.
6. The dynamics of the deformation of the rivet by ultrasonic impact / D. S. Fatyukhin, L. N. Britvin, S. Yu. Kuznetsov et al. // Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI). 2018. № 4(55). p. 17-21. R.I. Nigmatzyanov, S.K. Sundukov, D.S. Fatyukhin, S.Yu. Kuznetsov. Utility Model Patent No. 199610 U1 Russian Federation, MPK B21J 15/12. Riveting device: No. 2020100850; application 14.01.2020; publ. 09.09.2020.
8. Chin H. Toh. Ultrasonic riveting tool and method. Patent № US 9321099 B1 Apr. 26, 2016.
9. C.J. Clarke, R.S. Doo, M. Lucas, R.J. Trinick. Joining apparatus and method. Patent № US 2011/0126396 A1 Jun.2, 2011.

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

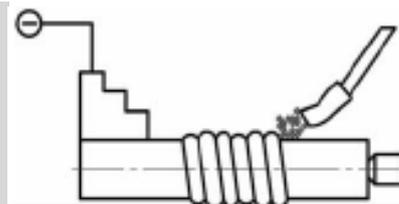
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 28.07.2022; принята к публикации 13.10.2022.

The article was submitted 14.07.2022; approved after reviewing 28.07.2022; assepted for publication 13.10.2022



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №12 (138). С. 38-43.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 38-43.

Научная статья  
УДК 621.793.74:62-408.64  
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-38-43

## Расчет рационального гранулометрического состава композиций для газотермического нанесения порошковых покрытий

Михаил Евгеньевич Соловьев<sup>1</sup>, д.ф.-м.н.,  
Сергей Львович Балдаев<sup>2</sup>, к.т.н.,  
Лев Христофорович Балдаев<sup>3</sup>, д.т.н.

Виктория Игоревна Мищенко<sup>4</sup>, зам. ген. директора по качеству

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

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

<sup>2</sup>s.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-7979>

<sup>3</sup>l.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9084-8771>

<sup>4</sup>v.mishchenko@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8494-0707>

**Аннотация.** Рассмотрена проблема выбора оптимального гранулометрического состава композиции для газотермического нанесения порошковых покрытий. Предложена методика выбора рационального гранулометрического состава композиции при заданных объемных долях компонентов.

**Ключевые слова:** дисперсная система, фракционный состав, кривая распределения, порошковое покрытие, газотермическое напыление

**Для цитирования:** Соловьев М.Е., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И. Расчет рационального гранулометрического состава композиций для газотермического нанесения порошковых покрытий // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 38-43. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-38-43.

Original article

## Site composition calculation for gas-thermal powder coating

Mikhail E. Soloviev<sup>1</sup>, D. Phys. Math.,  
Sergey L. Baldaev<sup>2</sup>, Can.Sc.Tech.,  
Lev Kh. Baldaev<sup>3</sup>, Dr.Sc.Tech.,  
Victoria I. Mishchenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia  
<sup>2,3,4</sup>Technological Systems of Protective Coatings LLC, Moscow, Shcherbinka, Russia

<sup>1</sup> me\_s@mail.ru, <sup>2</sup> s.baldaev@tspc.ru, <sup>3</sup> l.baldaev@tspc.ru, <sup>4</sup> v.mishchenko@tspc.ru

**Abstract.** The problem of choosing the optimal site composition formulation for gas-thermal powder coatings is viewed. A method for choosing a rational site composition formulation with given components parts by volume is proposed.

**Keywords:** disperse system, grain particle size, cumulative distribution curve, powder coating, gas thermal spraying

**For citation:** Soloviev M.E., Baldaev S.L., Baldaev L.Kh., Mishchenko V.I. Site composition calculation for gas-thermal powder coating. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 38-43. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-38-43.

## Введение

Газотермическое нанесение порошковых покрытий обеспечивает создание на поверхности деталей слоев материала с ценным комплексом свойств: повышенной износостойкостью, твердостью, коррозионной стойкостью, теплостойкостью и другими специальными свойствами [1 – 3]. Нанесение на поверхность изделия дисперсного материала осуществляется высокотемпературным газовым потоком, создаваемым при помощи газофакельной или плазменной свечи. При этом частицы, спекаясь на поверхности основы, образуют покрытие, обладающее требуемыми свойствами.

Физико-химические основы данной технологии достаточно сложны [4, 5], при этом немаловажную роль играет фракционный состав дисперсного материала. Хотя при формировании покрытия происходит сплавление отдельных частиц, тем не менее при малой плотности их упаковки покрытие может содержать поры, что отрицательно отражается на его прочностных свойствах.

Задача определения фракционного состава дисперсной системы, при котором достигается максимальная плотность упаковки составляющих ее частиц, встречается во многих областях техники, в том числе при подборе фракционного состава наполнителей для бетона и асфальто-бетонных композиций [6 – 9].

Теоретически проблема плотной упаковки сферических частиц начала изучаться достаточно давно. В качестве примеров плотной упаковки монодисперсных сферических частиц можно привести кубическую и гексагональную упаковку. Плотность кубической упаковки составляет  $\pi/6$  или 52,36 %. Гексагональная упаковка является наиболее плотной. Ее плотность составляет  $\frac{\pi}{3\sqrt{2}}$  или 74,05 %. Для получения более плотной структуры необходимо использовать би- или полидисперсные (присутствуют частицы двух и более размеров) смеси, т.к. пустоты, образующиеся при любом типе упаковки, заполняются частицами меньших размеров, уменьшая суммарную пустотность и увеличивая плотность упаковки. В этой связи разными авторами были предложены различные варианты функций распределения частиц по размерам, которые теоретически должны обеспечить максимально возможную их плотную упаковку [10 – 14]. Поскольку получение заданного распределения по размерам частиц практически достигается путем смешения отдельных фракций, полученных при ситовом рассеивании поли-

дисперсной смеси, такие теоретические распределения получили название оптимальных гранулометрических кривых или оптимальных кривых просеивания.

В отличие от технологии получения строительных и асфальто-бетонных смесей, в которых гранулометрическим составом композиции можно варьировать достаточно свободно, в случае порошковых композиций для газотермического нанесения покрытий такая возможность обычно отсутствует, поскольку смесь представляет собой ограниченный набор порошков, объемная доля которых задана исходя из требований к физическим свойствам покрытия. В этой связи возникают задачи либо выбора рационального гранулометрического состава композиций с заданным объемным соотношением компонентов, либо выбора объемного соотношения небольшого числа компонентов с заданным гранулометрическим составом.

Целью настоящей работы явилось сравнение различных оптимальных гранулометрических кривых и создание методики решения выше обозначенных задач по подбору рационального гранулометрического состава порошкообразной композиции для газотермического нанесения покрытия.

## Результаты и обсуждение

**Сравнение оптимальных гранулометрических кривых.** Из числа оптимальных кривых просеивания наиболее известным является уравнение, или интегральная функция распределения, предложенная Фуллером и Томпсоном в 1907 г. [15], имеющая вид:

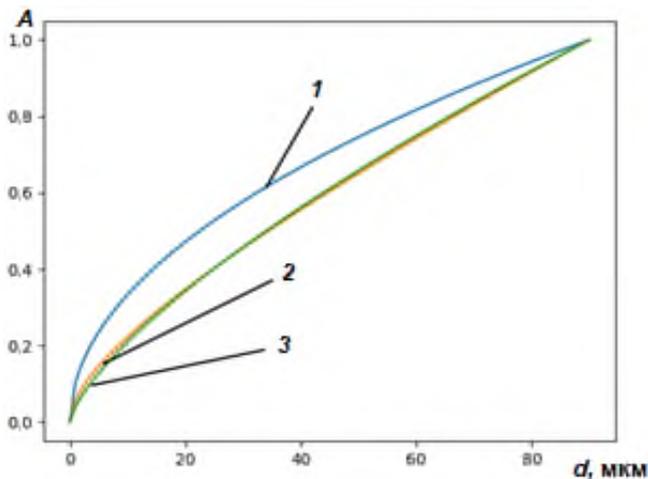
$$A_i = (d_i/d_{max})^n, \quad (1)$$

где  $A_i$  – проход частиц через условное сито размером  $d_i$  в относительных единицах;  $d_{max}$  – наибольший размер зерна в смеси, (или апертура верхнего сита);  $n$  – коэффициент распределения, равный по Фуллеру 0,5.

Швейцарской федеральной лабораторией по испытанию материалов разработана кривая гранулометрического состава плотных смесей с уравнением:

$$A_i = 0,5(d_i/d_{max} + \sqrt{(d_i/d_{max})}). \quad (2)$$

Заметим, что зависимость (2) может быть аппроксимирована уравнением (1) подбором показателя  $n$ . В качестве примера на рис. 1 показаны оптимальные гранулометрические кривые распределений: по уравнению (1) с показателем  $n = 0,5$ ; по уравнению (2) и по уравнению (1) с оптимизированным значением показателя  $n = 0,71$ .

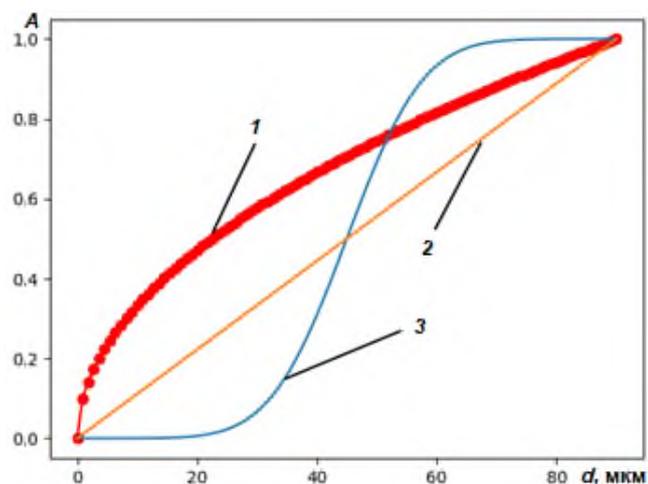


**Рис. 1. Оптимальные гранулометрические кривые распределения:**  
 1 – по уравнению (1) с показателем  $n = 0,5$ ; 2 – по уравнению (2); 3 – по уравнению (1) с показателем  $n = 0,71$

Как видно, кривая 3 с достаточной для практики точностью аппроксимирует кривую 2.

Предложены также и другие аналитические выражения для оптимальных гранулометрических кривых. Все они дают похожий вид кривых и, таким образом, могут быть аппроксимированы зависимостью, предложенной Фуллером, путем подбора соответствующего значения показателя  $n$ .

Распределение Фуллера существенно отличается от таких распространенных распределений, как равномерное и нормальное распределения. Для иллюстрации на рис. 2 приведено сравнение кривой распределения Фуллера с кривыми равномерного и нормального распределений.



**Рис. 2. Гранулометрические кривые распределений:**  
 1 – по уравнению (1) с показателем  $n = 0,5$ ; 2 – равномерное распределение в интервале  $[0, d_{max}]$ ; 3 – нормальное распределение с параметрами: среднее значение –  $d_{max}/2$ , стандартное отклонение –  $d_{max}/9$

Можно отметить, что для кривой просеивания Фуллера по сравнению с нормальным распределением характерно повышенное объемное содержание мелких фракций и отсутствие точек перегиба на кривой. Это является важной особенностью всех оптимальных кривых просеивания.

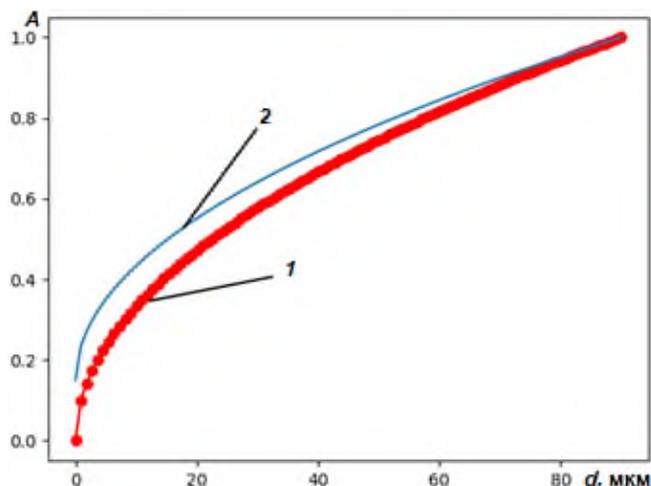
При теоретических исследованиях обычно рассматривают оптимальную кривую просеивания для систем со сферической формой частиц и не учитывают возможных отклонений от этой формы для реальных систем. Учет данного фактора может быть выполнен с помощью коэффициента формы частиц, который определяется как отношение площади поверхности эквивалентной сферы  $S_{sph}$  к площади поверхности частицы  $S_{part}$  равного объема:

$$K_{sf} = S_{sph}/S_{part}. \quad (3)$$

Поскольку сфера имеет минимальную площадь поверхности для тела заданного объема, то для реальных частиц фактор формы  $K_{sf}$  всегда меньше единицы и по данным многих исследователей может изменяться в пределах  $0,85 \dots 0,95$ . Для учета фактора формы уравнение Фуллера (1) может быть модифицировано в форму:

$$A_i = 1 - K_{sf} + K_{sf}(d_i/d_{max})^n. \quad (4)$$

На рис. 3 показано, как изменяется оптимальная гранулометрическая кривая по уравнению (4) при значении фактора формы равном  $0,85$ .



**Рис. 3. Оптимальные гранулометрические кривые распределения:**  
 1 – по уравнению (1) с показателем  $n = 0,5$ ; 2 – по уравнению (4) при значении фактора формы равном  $0,85$

Видно, что с увеличением развитости поверхности частиц оптимальная кривая просеивания будет смещаться вверх по сравнению с теоретической, особенно в области частиц малых размеров.

**Подбор фракционного состава композиции, близкого к оптимальному.** На практике для композиционного материала, состоящего из набора порошков с разным дисперсным составом, возникает задача подобрать его таким

образом, чтобы плотность упаковки частиц была наибольшей из возможных. При этом возникает два варианта задач подбора параметров для ограниченного набора фракций порошка:

1) при заданных размерах фракций компонентов подобрать соотношение их объемов так, чтобы функция распределения была наиболее близкой к теоретической;

2) при заданном объемном соотношении компонентов подобрать соотношение размеров их фракций.

При решении данных задач распределение размеров частиц в узкой фракции можно принять равномерным. Тогда опытная кривая распределения будет представлять собой набор отрезков прямых.

Степень близости опытной функции распределения к теоретической можно, например, оценивать по величине коэффициента детерминированности:

$$R^2 = 1 - \sum_i \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{(\hat{y}_i - y_i)^2}, \quad (5)$$

где  $y_i$  – значения функции оптимизируемого распределения  $\hat{y}_i$  – значения функции теоретического распределения;  $\bar{y}_i$  – среднее значение функции теоретического распределения.

Близость значения  $R^2$  к единице будет свидетельствовать о близости теоретического и исследуемого распределений.

Если объемные доли компонентов не заданы, то для их расчета можно использовать формулу теоретического распределения, например, (1). Весь имеющийся диапазон размеров частиц  $[0, d_{max}]$  с помощью набора сит рассеивается на фракции  $[d_{max}^{i-1}, d_{max}^i]$ ,  $i = 1 \dots N$ . При этом  $d_{max}^0 = 0$ ,  $d_{max}^N = d_{max}$ . Расчет объемов фракций производится на основании формулы теоретического распределения с использованием в ней  $d_{max}^i$  в качестве параметра. Если функцию теоретического распределения обозначить как  $A(n, d_i, d_{max}^i)$ , то объемные доли каждой фракции могут быть рассчитаны по формуле:

$$\phi^i - \phi^{i-1} = A(n, d_{max}^i, d_{max}^i) - A(n, d_{max}^{i-1}, d_{max}^i), \quad (6)$$

при этом  $\phi^0 = 0$ ,  $\phi^N = 1$ .

Формула для расчета функции опытного распределения в интервале размеров частиц  $[d_{max}^{i-1}, d_{max}^i]$  будет иметь вид:

$$y_i = \sum_{j=0}^{i-1} \phi^j + \phi^i (d_i - d_{max}^{i-1}) / (d_{max}^i - d_{max}^{i-1}). \quad (7)$$

Варьируя наборы диапазонов размеров частиц, что достигается путем наборов соответствующих сит, с использованием формул (6), (7) можно получать композиции с фракционным составом частиц, близким к функции

теоретического распределения, а следовательно, имеющими более высокую плотность упаковки. В качестве примера на рис. 5 приведена теоретическая кривая распределения (1) с показателем  $n = 0,5$  и две опытных функции порошка NiCr20, состоящие из трех фракций с равномерным распределением по размерам частиц внутри каждой фракции при разных наборах диапазонов размеров фракций  $[d_{max}^{i-1}, d_{max}^i]$ .

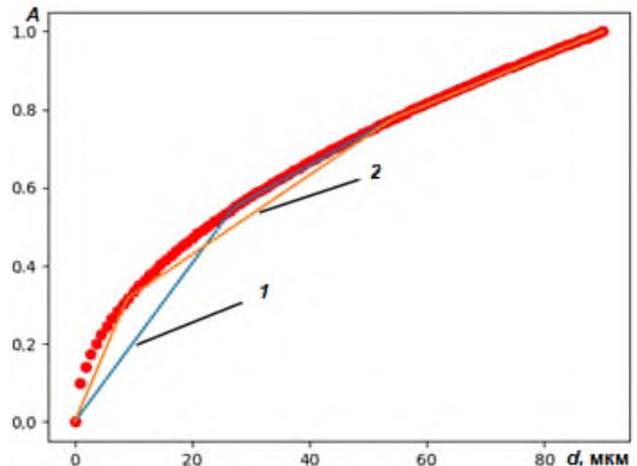


Рис. 4. Гранулометрические кривые распределений:

точки – теоретическое распределение по уравнению (1) с показателем  $n = 0,5$ ; линии – три фракции с равномерным распределением по размерам частиц при разных диапазонах размеров:

1 –  $[0 - 0,3d_{max}, 0,3d_{max} - 0,6d_{max}, 0,6d_{max} - d_{max}]$ ,  $R^2 = 0,961$ ; 2 –  $[0 - 0,1d_{max}, 0,1d_{max} - 0,6d_{max}, 0,6d_{max} - d_{max}]$ ,  $R^2 = 0,986$

Как видно, функция 2 имеет более близкие значения к теоретической, так что для нее следует ожидать более плотной упаковки частиц.

Таким образом, при заданном наборе фракций порошка использование формул (6), (7) позволяет получать гранулометрическую кривую, наиболее близкую к теоретическому распределению.

Если объемы фракций композиции заданы, например, исходя из требуемых свойств композиции, то можно решить другую задачу – при заданных объемах фракций  $\phi^i, i = 1 \dots N$  подобрать размеры частиц каждой фракции так, чтобы опытная функция распределения была наиболее близка к теоретической. В этом случае для нахождения размеров частиц каждой фракции  $d_{max}^i$  нужно решить систему нелинейных уравнений:

$$\sum_{j=0}^{N-i} \phi^j - A(n, d_{max}^i, d_{max}^i) = 0, \quad (8)$$

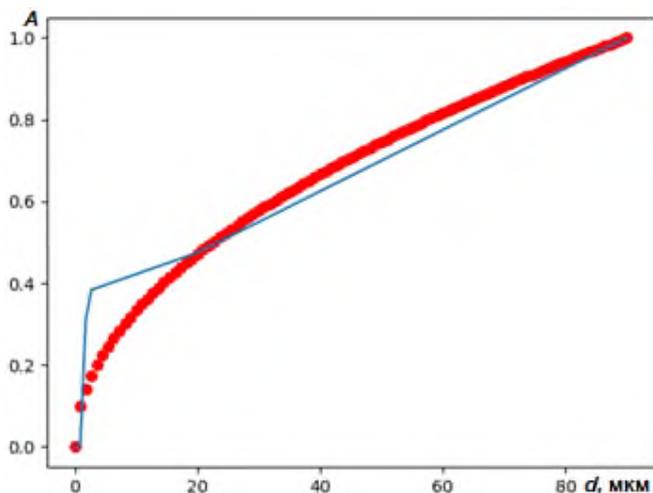
относительно переменных  $d_{max}^i$ . Опытную функцию распределения можно далее построить по формулам (7). Такую кривую целесооб-

разно назвать рациональной кривой распределения, подчеркнув этим, что она наиболее близка к оптимальной кривой просеивания при заданных объемных долях компонентов.

Для решения задачи (8) и построения кривой просеивания (7) в настоящей работе создано приложение на алгоритмическом языке Python с использованием библиотеки для математического моделирования Scipy.

В качестве примера рассмотрим построение рациональной кривой распределения для композиции из трех компонентов (оксид алюминия, сплав NiCr, нитрид бора) с объемными долями, представленными списком:  $\phi^1 = 0,34$ ,  $\phi^2 = 0,21$ ,  $\phi^3 = 0,45$ , заданными на основании требований к физико-химическим свойствам. В результате расчета был получен следующий рациональный фракционный состав данной композиции (в квадратных скобках минимальные и максимальные размеры частиц фракции в мкм): оксид алюминия [39, 90], сплав NiCr [7, 39], нитрид бора [1, 7].

На рис. 5 приведена теоретическая гранулометрическая кривая и рассчитанное рациональное распределение.



**Рис. 5. Гранулометрические кривые распределений:** точки – теоретическое распределение по уравнению (1) с показателем  $n = 0,5$ ; линия – рациональное распределение для композиции с объемными долями компонентов  $\phi^1 = 0,34, \phi^2 = 0,21, \phi^3 = 0,45, R^2 = 0,94$

В данном случае по значению  $R^2$  видно, что данное распределение несколько хуже аппроксимирует теоретическую кривую по сравнению с распределениями, приведенными на рис. 5. Это связано с тем, что в данном случае распределение объемных долей компонентов не является оптимальным с точки зрения гранулометрического состава, а принято заданным, полученным в результате оптимизации свойств композиции.

## Заключение

В настоящей работе рассмотрена проблема выбора функции распределения гранулометрического состава порошкообразной композиции для газотермического нанесения покрытий, обеспечивающая наиболее плотную упаковку частиц. Проведен сравнительный анализ теоретических распределений – оптимальных кривых просеивания, предложенных разными авторами.

Предложена методика решения задачи подбора фракционного состава порошкообразной композиции, наиболее близкого к теоретической кривой при заданных диапазонах размеров частиц фракций и при заданных объемных долях компонентов. Приведены примеры расчетов рационального фракционного состава композиции для газотермического нанесения покрытия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хасуи, А., Моригаки, О. Наплавка и напыление / Пер. с яп. В.Н. Попова; Под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
2. Кудинов, В.В., Бобров, Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
3. Газотермическое напыление / под общей ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с.
4. Davis, J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
5. Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. – 360 с.
6. Sobolev K., Amirjanov A. The simulation of particulate materials packing using a particle suspension model // Advanced Powder Technol. 2007. V. 18. No. 3. pp. 261-271.
7. Jia T., Zhang Y., Chen J.K. He Y.-L. Dynamic simulation of granular packing of fine cohesive particles with different size distributions // Powder Technology. 2012. V. 218. pp. 76-85.
8. Kalpana A., Neelavathi R., Narasimhulu K. Optimization of Aggregate Gradation and its effects on properties of normal strength concrete(M20) // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2019. V.6, No 7. pp. 1456-1465.
9. Liang Y., Cao, L., Liu J. et al. Numerical simulation of mechanical response of glacial tills under biaxial compression with the DEM // Bull Eng Geol Environ. 2019. V. 78. pp. 1575-1588.
10. Amirjanov A., Sobolev K. Optimization of A Computer Simulation Model for Packing of Concrete Aggregates // Particulate Science And Technology. 2008. V. 26(4). pp. 380-395.
11. Hwang C.L., Bui L.A.T., Chen C.T. Application of Fuller's ideal curve and error function to making high performance concrete using rice husk ash // Computers and Concrete. 2012. V. 10, No 6. pp. 631-647.
12. Tan B., Yang R. Application of Fractal Theory in Aggregate Gradation Research // Applied Mechanics and Materials. 2012. V. 204-208. pp. 1923-1928.
13. Cui W., Wu K., Cai X., Tang H., Huang W. Optimizing Gradation Design for Ultra-Thin Wearing Course

Asphalt // Materials. 2020. V.13. pp. 189-204.

14. Wang Z., Liang Q., Yan F., Bian G. Strength improvement of cement emulsified asphalt mixture through aggregate gradation design // Construction and Building Materials. 2021. V. 299. 124018.

15. Fuller W.B., Thompson S.E. The Laws of Proportioning Concrete // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1907. V. 59. No 2. pp. 67-143.

## REFERENCES

1. Hasui A., Morigaki O. Surfacing and spraying / Transl. from Japanese V.N. Popova; Ed. V.S. Stepina, N.G. Shesterkin. M.: Mashinostroenie, 1985. 240 p.

2. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Spray coating. Theory, technology and equipment. M.: Metallurgy, 1992. 432 p.

3. Thermal spraying / ed. L.H. Baldaev. M.: Market DS, 2007. 344 p.

4. Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. – ASM International, 2004. 338 p.

5. Puzryakov A.F. Theoretical foundations of plasma spraying technology. M.: Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman, 2008. 360 p.

6. Sobolev K., Amirjanov A. The simulation of particulate materials packing using a particle suspension model // Advanced Powder Technol. 2007. V. 18. No. 3. pp. 261-271

7. Jia T., Zhang Y., Chen J.K. He Y.-L. Dynamic simulation of granular packing of fine cohesive particles with different size distributions // Powder Technology. 2012. V. 218. pp. 76-85.

8. Kalpana A., Neelavathi R., Narasimhulu K. Optimization of Aggregate Gradation and its effects on properties of normal strength concrete(M20) // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2019. V.6. No 7. pp. 1456-1465.

9. Liang Y., Cao, L., Liu J. et al. Numerical simulation of mechanical response of glacial tills under biaxial compression with the DEM // Bull Eng Geol Environ. 2019. V. 78. pp. 1575-1588.

10. Amirjanov A., Sobolev K. Optimization of A Computer Simulation Model for Packing of Concrete Aggregates // Particulate Science And Technology. 2008. V. 26(4). pp. 380-395.

11. Hwang C.L., Bui L.A.T., Chen C.T. Application of Fuller's ideal curve and error function to making high performance concrete using rice husk ash // Computers and Concrete. 2012. V. 10, No 6. pp. 631-647.

12. Tan B., Yang R. Application of Fractal Theory in Aggregate Gradation Research //Applied Mechanics and Materials. 2012. V. 204-208. pp. 1923-1928.

13. Cui W., Wu K., Cai X., Tang H., Huang W. Optimizing Gradation Design for Ultra-Thin Wearing Course Asphalt // Materials. 2020. V.13. pp. 189-204.

14. Wang Z., Liang Q., Yan F., Bian G. Strength improvement of cement emulsified asphalt mixture through aggregate gradation design //Construction and Building Materials. 2021. V. 299. 124018.

15. Fuller W.B., Thompson S.E. The Laws of Proportioning Concrete // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1907. V. 59. No 2. pp. 67-143.

**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 11.08.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 21.10.2022.

The article was submitted 11.08.2022; approved after reviewing 16.09.2022; assepted for publication 21.10.2022.



## Указатель статей за 2022 г

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

- Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е.** Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом №1(127)-2022 г
- Белашова И.С., Петрова Л.Г., Брежнев А.А.** Структура и свойства композиционных слоев, полученных отжигом CVD покрытий на инструментальной стали №2(128)-2022 г
- Шерина Ю.В., Луц А.Р., Ибатуллин И.Д.** Разработка композиционного материала на основе сплава АК10М2Н и исследование его триботехнических свойств №2(128)-2022 г
- Демин П.Е., Барабанов С.И., Малахов А.Ю., Александров В.А.** Упрочнение штамповых сталей металлокерамическими покрытиями, получаемыми способом газового азотирования №2(128)-2022 г
- Сафронов Н.Н., Харисов Л.Р., Фазлыев М.Р.** Влияние состава шихтовой композиции электрошлакового процесса получения лигатуры Al-Ti-B на её структуру №3(129)-2022 г
- Латухин Е.И., Амосов Е.А., Умеров Э.Р., Давыдов Д.М.** Формирование структуры и состава кермета TiC/Al при самопроизвольной инфильтрации расплава алюминия в пористый горячий каркас карбида титана, полученный методом СВС №4(130)-2022 г
- Жадяев А.А.** Физико-механические свойства твердосплавного вооружения буровых шарошечных долот с типичными для сплава WC-Co неоднородностями структуры №6(132)-2022 г
- Петрова Л. Г., Белашова И.С., Бибииков П.С.** Совершенствование технологий химико-термической обработки для поверхностного упрочнения высоколегированных сталей авиационного назначения №8(134)-2022 г
- Казадаев Д.С., Грузков И.В., Маслякова А.А.** Влияние режимов термической обработки на механические свойства и стойкость сталей нефтепромысловых труб в модельной CO<sub>2</sub>-содержащей среде №10(136)-2022 г

### ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

- Черняев А.В., Корнюшина М.В., Чудин В.Н.** Технологические режимы прошивки-калибровки при локальном нагреве №4(130)-2022 г
- Зайдес С.А., Нгуен Х.Х.** Влияние кинематики тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей машин №6(132)-2022 г
- Дёмин В.А., Ларин С.Н.** Технологическое обеспечение и повышение качества заготовок, получаемых обработкой металла давлением №8(134)-2022 г
- Чудин В.Н.** Вязко-пластическое растяжение отверстия при отбортовке нагретого листа №10(136)-2022 г
- Кухарь В.Д., Коротков В.А., Яковлев С.С.** Получение рифлей по способу их изготовления на внутренней поверхности цилиндрической оболочки №11(137)-2022 г

### СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Сундуков С. К.** Анализ способов введения ультразвуковых колебаний в зону сварки №4(130)-2022 г
- Бржозовский Б. М., Зинина Е. П., Мартынов В. В.** Основные результаты и направления дальнейших исследований по низкотемпературному плазменному формированию композитных структур на рабочих поверхностях геометрически сложных металлических изделий №8(134)-2022 г

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

- Анахов С. В., Матушкин А. В., Пыкин Ю. А.** О выборе критериев эффективности газовыхревой стабилизации плазмотронов №1(127)-2022 г
- Платонов В. И., Пасынков А. А., Чудин В. Н.** Технологические режимы вытяжки анизотропного релаксирующего материала №2(128)-2022 г
- Чудин В. Н.** Формообразование газом обечаек торовой ёмкости №3(129)-2022 г

### АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

- Холопов А. А., Бинков И. И., Мианджи З.** Экспериментальное и численное исследование теплообмена при выращивании тонкостенных деталей методом коаксиального лазерного плавления №4(130)-2022 г
- Хандожко В. А., Макитрук К. А., Федукон А. Г.** Специфика реализации лазерных технологий упрочнения и наплавки на оборудовании с ЧПУ №4(130)-2022 г
- Александров В. Д., Петрова Л. Г., Белашова И. С., Морщилов М. В.** Системный подход к проблеме поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов лазерной обработкой №5(131)-2022 г
- Киричек А. В., Федонин О. Н., Федонина С. О., Сергеев А. Г.** Сравнительная оценка влияния технологии аддитивного синтеза на количество и размер пор в изделии №5(131)-2022 г
- Смоленцев В. П., Ненахов Н. Н., Извеков А. А., Стародубцев И. Г.** Аддитивные технологии изготовления инструмента для комбинированных методов обработки №7(133)-2022 г
- Хейфец М. Л., Крутько В. С., Грецкий Н. Л., Ратуцкая Д. С.** Комплексы мехатронного №7(133)-2022 г

- оборудования для аддитивного производства крупногабаритных изделий  
**Григорьянц А. Г., Лутченко А. В.** Современные проблемы развития аддитивных технологий в машиностроении №8(134)-2022 г  
**Киричек А. В., Федонин О. Н., Хандожко А. В., Жирков А. А., Соловьев Д. Л., Баринов С. В.** Гибридные технологии и оборудование аддитивного синтеза изделий №8(134)-2022 г

**ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК**

- Гусев В. Г.** Температура отверстий колец подшипников при шлифовании сборным текстурированным кругом // Научноёмкие технологии в машиностроении №1(127)-2022 г  
**Макаров В. Ф., Сединин И. Н.** Определение оптимальных режимов резания аналитико-графическим методом для обеспечения заданной микронеровности фрезерованной поверхности №2(128)-2022 г  
**Макарова О. А.** Исследование нагрева зуба традиционной пилы пакетного резания с использованием металлографического анализа №2(128)-2022 г  
**Куц В. В., Мальнева Ю. А.** Моделирование производящей поверхности фрезы-протяжки для обработки валов с равноосным контуром с поперечным расположением осей инструмента и вала №3(129)-2022 г  
**Гусев В. Г.** Сравнительный анализ механической прочности шлифовальных кругов №3(129)-2022 г  
**Четвериков С. В.** Влияние разности шагов зубьев торцевой фрезы на динамическую устойчивость нежесткой технологической системы №5(131)-2022 г  
**Голодце В. А., Лапшин В. П., Колпаков П. А.** Оценка динамики процесса токарной обработки металлов по измерениям снятым с режущего инструмента №6(132)-2022 г  
**Безьязычный В. Ф., Растегаев Е. В.** Повышение эффективности изготовления деталей при параллельной работе конструктора и технолога №7(133)-2022 г  
**Базров Б. М.** Системный подход применения видов технологии №7(133)-2022 г  
**Нигметзянов Р. И., Приходько В. М., Сундуков С. К., Сухов А. В., Фатюхин Д. С.** Способы ультразвукового поверхностного пластического деформирования №7(133)-2022 г  
**Гусейнов Г. А.** Моделирование и управление точностью шлифовальных операций №7(133)-2022 г  
**Братан С. М., Часовитина А. С.** Моделирование влияния относительных вибраций инструмента и заготовки на съем материала при внутреннем шлифовании №9(135)-2022 г  
**Киселев Е. С.** Новые технологии изготовления нежестких плоскостных деталей из авиационных материалов №9(135)-2022 г  
**Пятых А. С., Тимофеев С. А.** Оценка влияния износостойкого покрытия на процесс течения титанового сплава №10(136)-2022 г  
**Шумячер В. М., Медко С. В.** Повышение эффективности шлифовальных кругов на бакелетовой связке путем управления структурообразованием на разных этапах технологического процесса их производства №10(136)-2022 г  
**Гусев В. Г.** Волнистость плоских поверхностей, шлифованных периферией комбинированного инструмента №12(138)-2022 г  
**Воробьев А.А., Крутько А.А., Седых Д.А.** Исследование напряженного состояния твердосплавного инструмента при токарной обработке железнодорожных колес №12(138)-2022 г  
**Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Звонских В.В.** Ленточное глубинное шлифование – прогрессивный вид механической обработки №12(138)-2022 г  
**Унянин А.Н., Чуднов А.В.** Исследование параметров процесса при обработке фрезами с различным шагом между зубьями №12(138)-2022 г  
**Губанова А.А.** Методика изучения вибрационных процессов при фрезеровании №12(138)-2022 г

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

- Приходько В. М., Нигметзянов Р. И., Фатюхин Д. С., Крамаренко А. Ю., Нечай А. А.** Ультразвуковая очистка. Состояние и перспективы №1(127)-2022 г  
**Киселёв Е. С., Мезин Н. В., Штубов Н. С.** Повышение коррозионной стойкости шлифованных деталей рациональным применением энергии ультразвукового поля №2(128)-2022 г  
**Приходько В. М., Симонов Д. С., Сухов А. В., Фатюхин Д. С., Фомушкина С. А.** Применение гибридных ультразвуковых технологий для получения функциональных покрытий №3(129)-2022 г  
**Каменова А. Л.** Роль фазового и элементного состава, структуры и текстуры покрытий AlN и Ti1-xAlxN в их защитном эффекте №10(136)-2022 г  
**Иноземцев В. Е.** Исследование процесса формирования поверхности при механоэлектрохимической обработке сплавов на основе алюминия №11(137)-2022 г  
**Сундуков С.К.** Применение ультразвуковых технологий при получении заклёпочных соединений №12(138)-2022 г

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ**

- Плотников А. Л., Чигиринский Ю. Л., Тихонова Ж. С., Фролов Е. М., Крайнев Д. В.** Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надёжных значений параметров процесса металлообработки №3(129)-2022 г

**НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

- Татанов П. В., Шнайдер Д. А., Янюшкин А. Р., Янюшкин А. С.** Влияние износа оборудования на качество изготовления изделий из композиционных материалов №10(136)-2022 г
- Купряшов А. В., Шестаков И. Я., Телегин С. В.** Влияние формы электродов и их расположения на энергетический баланс получения графитового порошка электролизом №11(137)-2022 г

**НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН**

- Назарьев А. В., Бочкарев П. Ю., Митин С. Г.** Формализация стратегии выявления критических требований к сборке при проведении технологической подготовки многономенклатурных машиностроительных производств №10(136)-2022 г

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

- Тихомиров В. П., Измеров М. А., Кузнецов С. В., Горностаева А. Г.** Трение металл-металлических поверхностей №3(129)-2022 г
- Буяновский И. А., Левченко В. А., Самусенко В. Д.** Исследование структуры, состава и трибологических характеристик наноструктурных монокристаллических покрытий, полученных ионно-плазменным методом №4(130)-2022 г
- Суслов А. Г., Хандожко В. А.** Возможности одноступенчатого обеспечения контактной жесткости деталей на стадии проектирования №5(131)-2022 г
- Бреки А. Д., Чулкин С. Г., Шалыгин М. Г.** Аналитическое представление зависимостей коэффициента трения от температуры при фрикционном взаимодействии стального шара с термопластами №6(132)-2022 г

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

- Сандлер А. И.** Функционально-ориентированная технология затылования зубьев зуборезных червячных фрез нового стандарта №1(127)-2022 г
- Базров Б. М.** Выбор уровня технологической специализации производства №6(132)-2022 г
- Польский Е. А., Сорокин С. В.** Повышение надежности изделий машиностроения за счет совершенствования точностного анализа размеров цепей №6(132)-2022 г
- Васильев В. А., Александрова С. В.** Управление качеством на основе цифровых технологий №9(135)-2022 г
- Макаров В. Ф., Песин М. В., Абзаев Р. С.** Решение проблемы импортозамещения режущих инструментов на основе ускоренной диагностики физических параметров процесса резания №9(135)-2022 г
- Михайлов А. Н., Михайлов Д. А., Пичко Н. С., Шейко Е. А.** Методологические и технологические основы обеспечения функционально-ориентированных свойств структуры элементов газотурбинного двигателя №9(135)-2022 г
- Решетникова Е. П., Бочкарев П. Ю.** Принципы формирования комплекса контрольно-измерительных процедур в системе автоматизированного планирования производства №11(137)-2022 г
- Мясникова Л. А., Каменева А. Л.** Разработка комплекса контрольно-измерительных процедур для деталей с особоточными поверхностями на станках с ЧПУ №11(137)-2022 г
- Иванова Л. Н., Иванов С. Е.** Математические методы оптимизации режимов движения манипулятора в автоматизированном технологическом процессе №11(137)-2022 г

**НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕМОНТЕ, ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ**

- Яковлева Н. В., Фармаковский Б. В., Макаров А. М., Старицын М. В.** Исследование влияния отжига на свойства и структуру каталитического носителя на основе системы Ni-Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на металлической подложке, полученного методом холодного газодинамического напыления №5(131)-2022 г
- Чигиринский Ю. Л., Крайнев Д. В., Фролов Е. М.** Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание №8(134)-2022 г
- Соловьев М.Е., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И.** Расчет рационального гранулометрического состава композиций для газотермического нанесения порошковых покрытий №12(138)-2022 г

**Решение**  
**XIV международной научно-технической конференции**  
**«Технологическое обеспечение и повышение качества изделий**  
**машиностроения и авиакосмической отрасли» (ТМ-2022),**  
**посвященной**  
**50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей**  
**(5-7 октября 2022 г.)**

На конференции были представлены 16 пленарных докладов ведущих ученых России, 1 доклад ученого из республики Беларусь и 35 секционных доклада. Пленарные доклады опубликованы в №№ 7(133), 8(134), 9(135) за 2022 г. журнала «Научноёмкие технологии в машиностроении», тезисы секционных докладов – в специальном сборнике Брянского государственного технического университета.

В конференции приняло участие 270 человек из 10 регионов России, а также стран Азербайджана и Беларуси. В числе участников конференции вице-президент РАН академик Чернышёв С.Л., член-корреспондент РАН Приходько В.М., 25 докторов наук.

Участники конференции считают, что успешное развитие экономики России в условиях жесткой конкуренции и экономических санкций Евросоюза и США, принятых против России, возможно только при выпуске собственной высококачественной и конкурентоспособной продукции. Особенно это важно для базовых отраслей машиностроения и авиакосмической отрасли. Следует подчеркнуть – основой развития всех отраслей промышленности в условиях санкций является производство отечественного технологического оборудования.

Работы по решению проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиакосмической отрасли промышленные предприятия должны вести в тесном контакте с российскими учеными.

Учитывая вышеизложенное, участники конференции рекомендуют.

**Правительству РФ:**

1. Разработать программу ускоренного развития машиностроения России для выпуска собственной конкурентоспособной и высококачественной продукции.
2. Для ускоренного решения проблем импортозамещения промышленных товаров и технологической безопасности России создать отдельное Министерство промышленности РФ.
3. Учитывая, что технологической базой при производстве оборудования для всех отраслей промышленности являются станки и инструменты, создать государственную корпорацию (СТАНКОИНСТРУМЕНТ).
4. При создании новых и модернизации существующих промышленных предприятий машиностроения и авиакосмической отрасли предусмотреть выделение средств на научные технологические разработки в пределах 3 – 5 % от общей суммы на модернизацию.
5. При объявлении конкурсов по научным программам, проектам и грантам ввести раздел «Конструкторско-технологическое повышение качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» с отдельным финансированием.

**Министерству науки и высшего образования:**

1. Разработать и реализовать механизм стимулирования молодежи для поступления на технические специальности и в аспирантуру машиностроительного профиля.
2. Учитывая необходимость приоритетного развития промышленности, увеличить прием студентов на технические направления и специальности.
3. Вернуться к рассмотрению вопроса возможности подготовки инженеров по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» для предприятий ОПК с распределением выпускников по данным предприятиям.
4. Разработать экономический механизм реализации новых научноёмких, конкурентоспособных технологий на отечественных промышленных предприятиях, обеспечивающих повышение качества выпускаемых изделий.
5. Предусмотреть в Порядке приема на обучение по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры в разделе «Учет индивидуальных достижений поступающих по программам бакалавриата и

программам специалитета» начисление баллов за следующие индивидуальные достижения (для региональных вузов):

– наличие документа, подтверждающего обучение в региональных инновационно-образовательных и(или) технических центрах (центры технического творчества, кванториумы, региональные центры выявления, поддержки и развития способностей и талантов у детей и молодежи, центры технического образования и др.) до 20 баллов.

**Ростехнологии:**

1. Активнее взаимодействовать с Ассоциацией технологов-машиностроителей для привлечения отечественных научных школ с целью решения проблем технологического повышения качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли.

**Министерству просвещения РФ:**

1. Для повышения конкурса на направления и специальности по техническому образованию ввести для всех школьников обязательную единую систему сдачи выпускных экзаменов или государственных экзаменов после 11-ти классов по следующим предметам: русский язык и литература, математика, физика, химия, информатика, история, география, иностранный язык. Это даст возможность всем школьникам поступать на любые специальности, в том числе и технические.

**Технологическим научным школам:**

1. Наряду с дальнейшим развитием научных положений технологии машиностроения, активизировать исследования, особенно при выполнении кандидатских диссертаций, направленные на решение конкретных практических задач машиностроительных и авиакосмических предприятий России.

**Машиностроительным и авиакосмическим предприятиям:**

1. Активнее привлекать отечественных ученых в качестве консультантов для научного решения проблем повышения качества и конкурентоспособности выпускаемых изделий.

2. Активизировать работу по реализации положительных результатов исследований отечественных научных школ технологов в производство.

**Ассоциации технологов-машиностроителей:**

1. Продолжить работу по консолидации научных технологических школ, направленную на создание базы знаний по новым научноёмким технологиям и их реализации при модернизации машиностроительного комплекса России.

2. Развивать дальнейшее взаимодействие с научными школами технологов стран ЕвразЭС и ШОС.

3. Подключиться к работе по повышению квалификации инженеров-технологов.

4. XV международную научно-техническую конференцию (ТМ-2023) провести в 2023 г. на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана и ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского.

---

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

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

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

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

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

*Вёрстка С.В. Морозов. Редактор Д.А. Петраченко. Технический редактор С.В. Морозов.*

Сдано в набор 17.12.2022. Выход в свет 30.12.2022.

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