

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

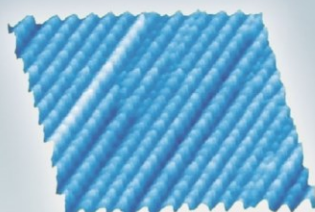
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

1 (151)
2024

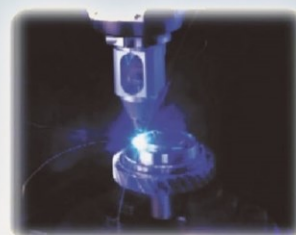
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



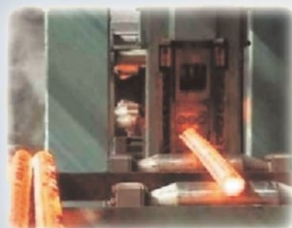
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



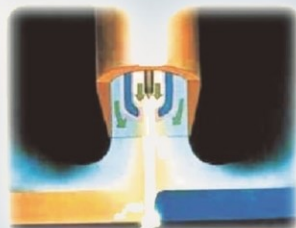
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



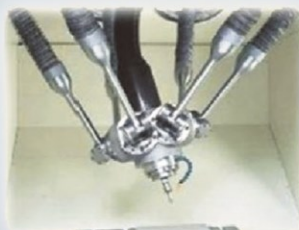
**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 1 (151)

2024

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

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

Председатель редакционного совета

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

Зам. председателя редакционного совета

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

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

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

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

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

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

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

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

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

д.т.н., доц. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

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

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

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

д.т.н., проф., акад. НАН Беларуси

МЫШКИН Н.К., (г. Гомель, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

26 апреля 2019 года

рег. номер ПИ № ФС77-75524

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Миненко Г.Н. Контроль прочности серого чугуна электрографическим
способом. 3

СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Овчинников В.В., Поляков Д.А. Горячее деформирование сварных
заготовок листов алюминиевого сплава 1565чМ 7

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Митин С.Г., Бочкарев П.Ю. Совершенствование принципов
автоматизированного планирования многономенклатурных
технологических процессов механообработки 16

Унянин А.Н., Чуднов А.В. Исследование влияния элементов режима
и шага зубьев фрезы на технологические параметры и температурное
поле процесса обработки заготовок тонкостенных деталей 23

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

Носенко В.А., Зуев А.В., Орлянский В.Е. Влияние микрогеометрических
параметров сферической поверхности ролика на звуковое давление
и вибрацию подшипника 30

Тихомиров В.П., Шалыгин М.Г., Измеров М.А., Крутов А.В.
Фрактальная размерность дискретного контакта 41

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

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 1 (151)

2024

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

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

Deputy chief editor

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

Chairman of Editorial Committee

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

Chairman Assistant

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

Editorial Committee:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

d.en.s., prof. TCHIGIRINSKY Ju.L. (Volgograd)

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

The magazine is distributed by subscription,
which can be issued through the online catalog
"Subscription Press".
Subscription index: **379195**.

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.
E-mail: editntm@yandex.ru
<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

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

CONTENTS

MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Minenko G.N. Strength control of grey cast iron by electrographic method 3

WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES

Ovchinnikov V.V., Polyakov D.A. Hot forming of welded blanks of aluminum
alloy sheets 1565 chM 7

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. The development of computer-aided planning
principles for multiproduct machining processes 16

Unyanin A.N., Chudnov A.V. Investigation of mode elements effect and the
influence of milling cutter teeth space on technological parameters and
temperature field of work on a thin-walled parts workpieces 23

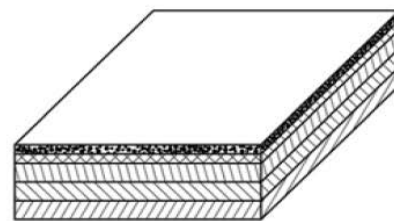
SURFACE LAYER QUALITY, CONTACT INTERACTION, FRICTION AND WEAR OF MACHINE PARTS

Nosenko V.A., Zuev A.V., Orlyansky V.E. Microgeometric parameters effect of
the spherical roller surface on bearing sound pressure and vibration 30

Tikhomirov V.P., Shalygin M.G., Izmerov M.A. Krutov A.V.
Fractal dimension of a discrete contact 41

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. 2024. №1 (151). С.3-6.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №1 (151). P.3-6.

Научная статья
УДК 621.74.628:669.131.6
doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-6

Контроль прочности серого чугуна электрографическим способом

Георгий Николаевич Миненко, к.т.н.
Ресурсный центр отраслевого машиностроения Московской области,
Люберцы, Россия
minenko1946@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2839-2045>

Аннотация. Представлена методика опытов на экспериментальной установке по определению величин электрического сопротивления в процессе кристаллизации чугуна. Дана схема экспериментальной установки, в которой для определения величины удельного электрического сопротивления кристаллизующегося чугуна использована измерительная схема на основе мостовой схемы метода Уитстона. Фиксирование результатов измерений во времени позволило построить графическую зависимость изменения значений удельного электрического сопротивления в процессе кристаллизации серого чугуна. Приведены экспериментальные данные изменения значений удельной электропроводности образца серого чугуна в процессе кристаллизации и их связи с величиной переохлаждения расплава этого сплава. Полученная зависимость дала возможность выявить на кривой изменения величины удельного электрического сопротивления в процесс охлаждения чугунного образца участки, связанные с переохлаждением расплава чугуна. Соотношение начальных и конечных величин удельного электрического сопротивления периода переохлаждения чугуна позволило вычислить значения относительного удельного электрического сопротивления. Измерения прочностных свойств чугунов показали, что они функционально связаны со значением относительного удельного электрического сопротивления серого чугуна, определяемого величиной переохлаждения расплава чугуна. Использование данного метода позволит прогнозировать прочностные свойства серого чугуна и даст возможность снизить величину брака отливок по механическим свойствам, что повысит рентабельность литейного производства.

Ключевые слова: технологический процесс, серый чугун, кристаллизация, электрическое сопротивление, величина переохлаждения, относительное электросопротивление, электрографический способ, прочностные свойства чугуна

Для цитирования: Миненко Г.Н. Контроль прочности серого чугуна электрографическим способом // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 3–6. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-6

Strength control of grey cast iron by electrographic method

Georgy N. Minenko, Ph.D. Eng.,
Resource Center for Industrial Engineering of the Moscow region,
Lyubertsy, Russia
minenko1946@mail.ru

Abstract. The experimental procedure carried out on a test installation to determine the electrical resistance value in the process of crystallization of cast iron is presented. A scheme of a test installation using a measuring circuit based on the Wheatstone bridge circuit to determine the electrical resistance value of crystallized cast iron is given. Recording measured data over time allowed constructing a graphical dependence of the change in the values of specific electrical resistance during the crystallization of gray cast iron. Experimental data on changes in the values of the specific electrical conductivity of a sample of gray cast iron during crystallization and their relationship to the amount of supercooling of the melt of this alloy are presented. The obtained dependence made it possible to identify on the curve of specific electrical resistivity change under supercooling of cast-iron test sample those areas, which were

exposed to the cast-iron melt supercooling. The ratio of the initial and final values of the electrical resistivity under supercooling of cast iron allowed calculating the values of the relative electrical resistivity. Measurements of cast iron strength have shown that they are functionally related to the value of the relative electrical resistivity of gray cast iron, determined by the degree of supercooling of the cast iron melt. The use of this method will make it possible to predict gray cast iron strength and will allow reducing the amount of castings defective in terms of mechanical properties and at the same time increasing foundry production profitability.

Keywords: technological process, grey cast iron, crystallization, electrical resistance, supercooling value, relative electrical resistivity, electrographic method, cast iron strength

For citation: Minenko G.N. Strength control of grey cast iron by electrographic method / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 3–6. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-6

Технологические процессы получения серого чугуна имеют особенности связанные с тем, что химический состав этих чугунов рекомендуется при нормировании величин их прочности [1]. Прочность серого чугуна определяет марку, поэтому особенную актуальность приобретает решение вопроса контроля прочностных свойств чугуна, находящегося ещё в жидком состоянии.

При заданной температуре металлического расплава литейного сплава значение его электрического сопротивления R , используя определение [2, 3], можно описать уравнением: $R = f(R_1 R_2 R_3)$, где R_1 – электрическое сопротивление примесей в сплаве; R_2 – электрическое сопротивления центров кристаллизации; R_3 – электрическое сопротивление при заданной температуре.

Для определения величин электросопротивления R расплава чугуна использовали мостовую схему метода Уитстона [4]. Экспериментальная установка позволяла измерять величину R при переходе образца серого чугуна из жидкого в твёрдое состояние с точностью измерения 0,650 %. Данная установка с образцами чугуна диаметром 30 мм (рис. 1)

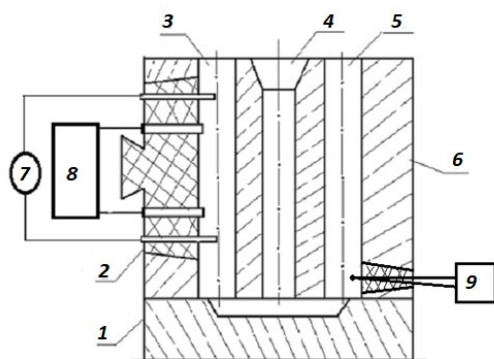


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по определению влияния величин электросопротивления чугуна на прочность серого чугуна

Fig. 1. Scheme of a test installation to determine the effect of the electrical resistance of cast iron on gray cast iron strength

Установка состоит из: 1 – нижняя литейная полуформа; 2 – измерительная ячейка, выполненная из стержневой смеси; 3 – полость литейной формы для образца чугуна с диаметром 30 мм; 4 – стояк формы с чашей; 5 – полость литейной формы для вторых образцов серого чугуна; 6 – верхняя литейная полуформа. Для подвода к полости образца переменного электрического поля $U_{\text{пер}}$ от звукового генератора (ЗГ-17) использовали вольфрамовые электроды диаметром 8,0 мм. Со второй пары вольфрамовых электродов диаметром 6,0 мм марки ВА измеряемое напряжение $U_{\text{изм}}$ с мостовой схемы 8 передавалось на потенциометр с автоматической записью показаний. Для определения температуры заливки чугуна в литейную форму применяли вольфрам-рениевую термопару 9 типа ВР-5/20.

Постоянные значения измерительной ячейки K потенциальных электродов 8 определяли по отношению расстояния между измерительными электродами $L_{\text{изм}}$ (внутренние электроды ячейки с $U_{\text{изм}}$) и величины площади продольного сечения электродов S , т. е.

$$K = \frac{L_{\text{изм.}}}{S} \quad (1)$$

Значения K при измерениях с помощью использованного датчика величин электрического сопротивления R металлического расплава в испытываемых образцах чугуна были одинаковы.

Величину R рассчитывали по формуле:

$$R = R_n \frac{R_K}{r}, \quad (2)$$

где R_n – величина нормального сопротивления в мостовой схеме; R_K – значение сопротивления в мостовой схеме в момент компенсации величины $U_{\text{изм}}$; r – сопротивление постоянного плеча мостовой схемы.

Результаты экспериментов выявили, что во временном интервале от τ_1 до τ_2 (рис. 2) наблюдается период переохлаждения чугуна, который характеризуется величиной

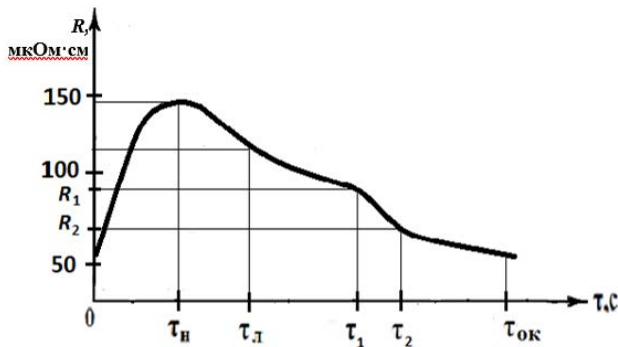


Рис. 2. Зависимость изменения электросопротивления расплавов серого чугуна R от времени кристаллизации сплава τ

Fig. 2. Dependence of the change in electrical resistance of gray cast iron plates R on the crystallization time of the alloy τ

электросопротивления $R_{\text{пер}}$ сплава. Значение $R_{\text{пер}}$ определяется разностью величин R_1 и R_2 и зависит от степени переохлаждения чугуна, зависящей от уровня энергии необходимой для протекания процесса образования кристаллов твёрдой структуры в металлическом расплаве чугуна [5, 6].

По результатам экспериментов была построена графическая зависимость изменения величин предела прочности σ_B чугуна от относительного электросопротивления ΔR сплава (рис. 3).

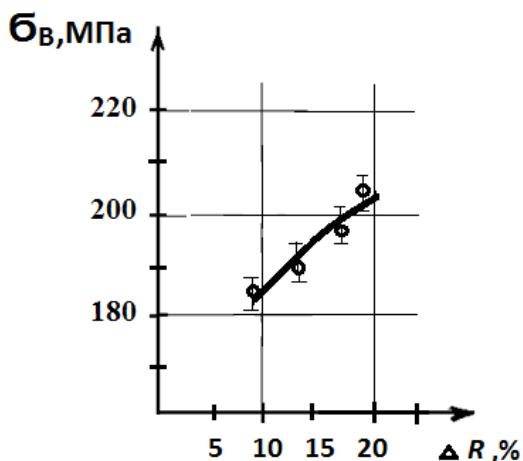


Рис. 3. Зависимость прочностных свойств серых чугунов σ_B от относительной величины сопротивления ΔR

Fig. 3. Dependence of gray cast iron strength σ_B on relative value of resistance ΔR

В качестве параметра ΔR было использовано процентное отношение разности значений R_1 и R_2 к величине R_1 , т. е.

$$\Delta R = \frac{R_1 - R_2}{R_1} 100 \%$$

Эта зависимость показала, что значения прочностных свойств серых чугунов повышаются при росте относительной величины сопротивления ΔR . Увеличение ΔR можно объяснить наличием примесей и количеством центров кристаллизации графита и первичного аустенита в жидком сплаве, влияющих на величину электрического сопротивления серого чугуна.

Как известно [6 – 8], процесс кристаллизации серого чугуна непосредственным образом влияет на образование структуры сплава, что определяет его физические свойства. Изменения условий процесса кристаллизации чугунов, определяемые величиной переохлаждения расплава чугуна [9, 10], приводят к изменению значений относительного электросопротивления ΔR , зависящих от количества токоносителей, примесей и состояния твёрдой фазы в кристаллизующемся сплаве. Повышении величины переохлаждения расплава приводит к росту количества центров кристаллизации в единице объёма расплава чугуна, что связано с увеличением ΔR . Такое повышение числа кристаллов сплава делает структуру чугуна более дисперсной с более высокими прочностными свойствами. Это даёт возможность по зависимости $\sigma_B = f(\Delta R)$ определять прочностные свойства серых чугунов, находящихся ещё в жидком состоянии [11, 12].

Заключение

Таким образом, полученный на основе использованной методики, электрографический способ позволяет прогнозировать величину прочностных свойств серых чугунов. В условиях литейного производства возникает возможность по величине ΔR расплава чугуна определять его прочность и при несоответствии прочностных свойств заданным значениям провести специальные технологические операции для устранения этих отклонений. Применение данного способа контроля прочности сплавов позволит также тестировать в условиях конкретного технологического процесса получение литейного сплава заданной

марки, что снизит процент брака чугунных отливок по механическим свойствам и увеличит рентабельность производства литой заготовки деталей для машиностроения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

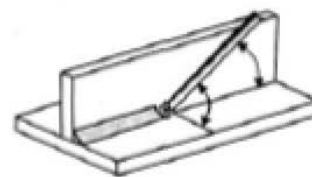
1. **Гиршович Н.Г.** Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М.: Машиностроение, 1966. 562 с.
2. **Ершов Г.С., Черняков В.А.** Строение и свойства жидких и твёрдых металлов. М.: Metallurgiya, 1978. 248 с.
3. **Вертман А.А., Самарин А.М.** Свойства расплавов железа // М.: Наука, 1969. 280 с.
4. **Физико-химические** методы исследования металлургических процессов / Филиппов С.И., Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Крашенинников М.Г. М.: Metallurgiya, 1968. 551 с
5. **Куманин И.Б.** Вопросы теории литейных процессов. Формирование отливок в процессе затвердевания и охлаждения сплава. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.
6. **Жидкие металлы и их затвердевание** / Сб. статей под ред. Б.Я. Любова. М.: Metallurgizdat, 1962. 434 с.
7. **Новиков В.Ю.** Физические и механические свойства металлов. М.: МИСиС, 1976. 99 с.
8. **Вилсон Д.Р.** Структура жидких металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1972. 245 с.
9. **Регель А.Р., Глазов В.М.** Физические свойства электронных расплавов. М.: Наука, 1980. 296 с.
10. **Арсентьев П.П., Коледов Л.А.** Металлические расплавы и их свойства. М.: Metallurgiya, 1972. 376 с.
11. **Миненко Г.Н.** Электрографический метод прогнозирования прочностных свойств литой стали и чугуна // Литьё Украины. 2021. № 3. С. 16–18.
12. **Миненко Г.Н.** Влияние графитизации на удельную электропроводность серого чугуна // «Металлургия машиностроения». 2022. № 11. С. 10–12.

REFERENCES

1. Girshovich N.G. Crystallization and cast-iron properties in castings // Moscow: Mashinostroenie, 1966, 562 p.
2. Ershov G.S., Chernyakov V.A. Structure and properties of liquid and solid metals // Moscow: Metallurgiya, 1978. 248 p.
3. Vertman A.A., Samarin A.M. Properties of iron melts // Moscow: Nauka, 1969, 280 p.
4. Physico-chemical methods for the study of metallurgical processes // Filippov S.I., Arsentiev P.P., Yakovlev V.V., Krashennnikov M.G. M.: Metallurgy, 1968, 551 p
5. Kumanin I.B. Issues of theory of casting processes. Formation of castings during solidification and cooling of alloy // Moscow: Mashinostroenie, 1976, 216 p.
6. Liquid metals and their solidification // Collection of articles edited by B.Ya. Lyubov. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 434 p.
7. Novikov V.Yu. Physical and mechanical properties of metals // Moscow: MISiS, 1976, 99 p.
8. Wilson D.R. The structure of liquid metals and alloys // Moscow: Metallurgiya, 1972, 245 p.
9. Regel A.R., Glazov V.M. Physical properties of electronic melts // Moscow: Nauka, 1980, 296 p.
10. Arsentiev P.P., Koledov L.A. Metallic melts and their properties // Moscow: Metallurgiya, 1972, 376 p.
11. Minenko G.N. Electrographic method of forecasting strength properties of cast steel and cast iron // Casting of Ukraine, 2021, No. 3, pp. 16–18.
12. Minenko G.N. The influence of graphitization on the specific electrical conductivity of gray cast iron // Metallurgy of mechanical engineering, 2022, No. 11, pp. 10–12.

Статья поступила в редакцию 04.11.2023; одобрена после рецензирования 27.11.2023; принята к публикации 07.12.2023.

The article was submitted 04.11.2023; approved after reviewing 27.11.2023; assepted for publication 07.12.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №1 (151). С. 7-15.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №1 (151). P. 7-15.

Научная статья
УДК 621.791.75
doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-15

Горячее деформирование сварных заготовок листов алюминиевого сплава 1565чМ

Виктор Васильевич Овчинников¹, д.т.н.

Денис Алексеевич Поляков², аспирант

^{1,2} Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ vikov1956@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2948-2202>

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

Аннотация. Рассмотрены особенности деформирования в холодном и нагретом состояниях сварных заготовок сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм, выполненных сваркой трением с перемешиванием. Установлено, что сварные соединения сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм, полученные сваркой трением с перемешиванием обладают высокими прочностными свойствами в сочетании с достаточной пластичностью. Так угол изгиба соединений составляет соединений составляет 165...170 °. Коэффициент прочности сварного соединения составляет 0,96 от прочности основного металла. При этом временное сопротивление металла шва по своему значению превосходит временное сопротивление как основного металла, так и сварного соединения. Соединения сплава 1565чМ, выполненные сваркой трением с перемешиванием, обладают хорошей деформируемостью при холодной деформации. Эта особенность сварных заготовок из листов сплава 1565чМ объясняется наличием в структуре зоны перемешивания мелкозернистой рекристаллизованной структуры, которая формируется в результате теплового и силового воздействия рабочего инструмента на свариваемый материал в процессе осуществления сварки. Режимы сварки, обеспечивающие указанные механические свойства соединений, были использованы для сварки обечайки (заготовок) газовых баллонов (лейнеров). Технология изготовления таких баллонов включает в себя следующие операции: сварка обечайки, калибровка обечайки, контроль качества шва на обечайке, осадка обечайки в горячую форму для формовки днищ, варка штуцеров и общий контроль на герметичность. Эксперименты по формовке днищ лейнеров за счет осадки обечайки в нагретую до 450...500 °С показали, что наблюдается интенсивное вытекание металла шва за счет различий в деформационной способности металла шва и основного металла. Такое поведение металла шва при горячем деформировании можно объяснить проявлением эффекта сверхпластичности металла шва в виду наличия рекристаллизованной ультра мелкозернистой структуры. Установлено, что начиная с температуры 400 °С относительное удлинение металла шва существенно превосходит значение удлинения основного металла. При температуре 450 °С указанное различие достигло уже 72 %. Для сварного шва сплава 1565чМ начиная с температуры нагрева 540 °С происходит аномальный рост зерна, который захватывает весь шов.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; алюминиевый сплав; горячее деформирование; металла шва; микроструктура; сверхпластичность, аномальный рост зерна

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту Российского научного фонда №22–19–00121 «Закономерности структурно-фазовых превращений в алюминий-кальциевых сплавах, легированных цинком и магнием, в условиях сварки».

Для цитирования: Овчинников В.В., Поляков Д.А. Горячее деформирование сварных заготовок листов алюминиевого сплава 1565чМ // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 7–15. doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-15

Hot forming of welded blanks of aluminum alloy sheets 1565 chM

Viktor V. Ovchinnikov¹, D. Eng.

Denis A. Polyakov², PhD student

^{1, 2} Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

¹ vikov1956@mail.ru

² da_polyakov@mail.ru

Abstract. The details of forming in cold or heated position for welded blanks of alloy 1565chM with a thickness of 8,0 mm, performed by friction stir welding, are viewed. It is found that welded joints of alloy 1565chM with a thickness of 8,0 mm, obtained by friction stir welding have high strength properties together with sufficient toughness. Thus, bending angle of the joints is 165...170 °. The strength factor of the welded joint is 0.96 of the strength of the base metal. At the same time, the temporary resistance of the weld metal exceeds temporary resistance of both: base metal and the welded joint in its value. The 1565chM alloy joints, made by friction stir welding have good formability under cold deformation. This special feature of welded blanks made of 1565chM alloy sheets is explained by the presence of a fine-grained recrystallized structure in a stir zone, which is formed as a result of heat impact and force action of the working tool on the material to be welded. Welding modes providing specified mechanical properties of the joints were used for welding shells (blanks) of gas cylinders (liners). Manufacturing technique for such cylinders includes the following operations: welding of the shell, calibration of the shell, quality control of the weld on the shell, jumping into a hot mold for forming bottoms, welding of fittings and general tightness control. Experiments on forming liners bottoms due to the shell jumping into a heated to 450...500 °C mold have shown that there is an intensive weld metal runout due to differences in the strain capacity of the weld metal and the base metal. This behavior of the weld metal during hot forming can be explained by superductility of the weld metal owing to the presence of a recrystallized ultrafine-grained structure. It was found that starting from a temperature of 400 °C, the relative elongation of the weld metal significantly exceeds the elongation value of the base metal. In case of 450 °C, this difference reaches 72 %. For the weld of the 1565chM alloy, starting from the heating temperature of 540 °C, an abnormal grain growth occurs along the entire weld.

Keywords: friction stir welding; aluminum alloy; hot forming; weld metal; microstructure; superductility, abnormal grain growth

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under the project of the Russian Scientific Foundation No.22-19-00121 «Patterns of structural phase transformations in aluminum-calcium alloys alloyed with zinc and magnesium under welding conditions».

For citation: Ovchinnikov V.V., Polyakov D.A. Hot forming of welded blanks of aluminum alloy sheets 1565 chM / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 7–15. doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-15

Введение

При соединении холоднокатанных листов сплавов системы Al–Mg, таких как AMг5, AMг6 и 1565чМ, с использованием сварки плавлением в сварном шве формируется литая дендритная структура, что приводит к существенному увеличению размера зерен, а также имеет место укрупнение наночастиц вторых фаз. В зоне термического влияния под действием сварочного тепла наблюдается снятие упрочнения за счет пластической деформации листового полуфабриката.

При холодной деформации сварных заготовок из сплавов системы Al–Mg, выполненных сваркой плавлением, даже в соединениях без внутренних дефектов зачастую наблюдается образование трещин по зоне сплавления и по металлу шва в процессе деформирования [1].

Кроме того, как при холодном, так и при горячем деформировании сварных

заготовок, полученных сваркой плавлением, требуется удаление механическим путем выпуклости шва с лицевой и корневой сторон соединения.

Для повышения деформационной способности сварных заготовок сплавов системы Al–Mg стремятся измельчить структуру металла шва. С этой целью в присадочный металл вводят скандий в количествах до 0,5 %. Введение скандия позволяет уменьшить средний размер зерна в шве и частично решить проблему с холодным деформированием сварных заготовок из алюминиевых сплавов [2, 3].

Использование сварки трением с перемешиванием (СТП), в основе которой лежат процессы интенсивной пластической деформации (ИПД) при повышенной температуре, позволяет решить эту проблему. Максимальная температура нагрева заготовок в процессе СТП не превышает 500...520 °C, а время воздействия исчисляется минутами. При

определенных режимах влияние СТП на частицы вторых фаз может быть минимизировано, что позволяет сохранить высокие прочностные свойства в сварных соединениях [4 – 8].

В сварном шве формируется мелкозернистая или ультра мелкозернистая структура (УМЗ), которая обеспечивает высокие механические свойства [9, 10]. В зависимости от режима СТП прочность шва в термически неупрочняемых сплавах может не только достигать прочности основного материала в отожженном состоянии, но и превосходить его [11]. Как правило, сварные заготовки, полученные сваркой трением с перемешиванием из термически неупрочняемых алюминиевых сплавов, хорошо деформируются в холодном состоянии. Такие заготовки применяются при изготовлении днищ котлов железнодорожных цистерн, а также цистерн автомобильных цементовозов и бензовозов.

При изготовлении сварных воздушных баллонов сварная заготовка для претерпевает горячее деформирование. Сведения по горячему деформированию сварных заготовок, выполненных сваркой трением с перемешиванием из термически неупрочняемых алюминиевых сплавов, в технической литературе на данное время практически отсутствуют.

Поэтому целью настоящей работы являлось исследование механических свойств и структуры сварных соединений сплавов системы Al–Mg, полученных сваркой трением с перемешиванием, а также рассмотрение особенностей горячего деформирования сварных заготовок из алюминиевого сплава 1565чМ.

Материалы и методы

В исследовании использовались отожженные листы из сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм, химический состав которого приведен в табл. 1 (по основным элементам).

1. Химический состав листов сплава 1565чМ

1. Chemical composition of 1565chM alloy sheets

Марка сплава	Массовая доля элемента								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Zn	Ti
1565ч	0,20	0,30	0,05...0,10	0,40...1,20	5,10...6,20	0,02...0,25	0,05...0,20	0,45...1,0	0,02...0,10

Механические свойства листов сплава 1565чМ в отожженном состоянии приведены в табл. 2.

2. Механические свойства листов сплава 1565чМ

2. Mechanical properties of 1565hM alloy sheets

Полуфабрикат, толщина	Направление вырезки образцов	Механические свойства				
		Временное сопротивление σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Угол изгиба α , °	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²
Лист толщиной 8,0 мм	Поперечное	<u>345...365</u> 350	<u>188...205</u> 190	<u>16,0...17,8</u> 17,2	70	20,0
	Продольное	<u>360...385</u> 370	<u>210...235</u> 220	<u>17,5...18,8</u> 18,0	–	–
<i>Примечания:</i> в числителе приведены минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние по результатам испытаний пяти образцов.						

Сварку трением с перемешиванием осуществляли на лабораторной установке, изготовленной на базе вертикального фрезерного

станка с ЧПУ и дополнительно оснащенного индикатором вертикального перемещения фрезерной головки. Для сварки использовался

инструмент, выполненный из быстрорежущей стали, со штифтом конусообразной формы и винтовой линией [12].

В общем случае ширина сварного шва зависела от размера заплечика используемого рабочего инструмента. Все сварные соединения, исследованные в данной работе, были выполнены инструментами, которые формировали для плит шов шириной с лицевой стороны – 30 мм. Режимы сварки образцов приведены в табл. 3. Сварка осуществлялась в одностороннем варианте.

Длину наконечника инструмента выбирали таким образом, чтобы она была на 0,10...0,15 мм меньше толщины свариваемого металла. Сварку выполняли углом вперед при наклоне инструмента относительно вертикальной оси на 2,0...3,0°. С помощью суппорта закрепленный на валу электродвигателя инструмент перемещался в вертикальной плоскости, благодаря чему обеспечивалось необходимое заглубление его рабочих частей в свариваемый материал, и поддерживалась постоянная величина осевого усилия его прижатия к соединяемым деталям в процессе сварки.

3. Параметры режима сварки трением с перемешиванием листов сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм

3. Parameters of friction stir welding mode for 1565chM alloy sheets with a thickness of 8,0 mm

Параметры режима СТП	Значения параметров
Скорость сварки, м/ч	12,5...28,2
Частота вращения инструмента, об/мин	500...1000
Нормальное усилие прижатия инструмента к заготовкам, Н	9000...9500
Угол наклона инструмента в вертикальной плоскости, °	2,0...3,0
Длина штифта, мм	7,8
Диаметр штифта, мм	6,2
Диаметр заплечика, мм	16

При рентгеновском контроле сварных соединений в качестве источника ионизирующего излучения применяли рентгеновский аппарат РУМ 7 с диапазоном регулировки напряжения от 10 до 60 кВ и током анода до 30 мА. В качестве детектора рентгеновского излучения применяли радиографическую пленку AGFA D5 класса C4 по ISO 11699.

Из полученных сварных соединений в соответствии с ГОСТ 6996-66 изготавливали образцы с шириной рабочей части 15 мм для определения их предела прочности при одноосном растяжении. Ширина рабочей части образцов для определения характеристик сопротивления усталости составляла 25 мм. Предел кратковременной прочности при растяжении и угол статического изгиба определяли на установке Zwick/Roell Z030. Для определения ударной вязкости использовался одностоечный маятниковый копер МИК.

Для определения временного сопротивления металла шва (зона перемешивания) испытывались специальные образцы с зачищенной заподлицо с поверхностью основного

металла швом и с уменьшенной шириной образца до 6,0 мм за счет полукруглых выборок радиусом 5,0 мм [13].

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Leica DM IRM с программно-аппаратным комплексом обработки изображения «Image Expert Pro3x».

Химическое травление образцов для выявления микроструктуры алюминиевых сплавов проводили раствором Келлера (HF – 1,0 мл; HCl – 1,5 мл; HNO₃ – 2,5 мл; H₂O – 95,0 мл) и раствором, состоящего из реактива Пултона (HF – 2,0 мл; HCl – 3,0 мл; HNO₃ – 20 мл; H₂O – 175 мл), HNO₃ – 50 мл; H₂O – 40 мл; CrO₃ – 12 г.

Для исследования влияния температуры нагрева образцов на микроструктуру металла зоны перемешивания использовалась лабораторная муфельная печь SNOL 4/900.

Результаты и их обсуждение

Механические свойства соединений листов сплава 1565чМ приведены в табл. 4.

4. Механические свойства сварных соединений листов сплава 1565чМ толщиной 8,0 мм

4. Mechanical properties of welded joints of 1565chM alloy sheets with a thickness of 8,0 mm

Образец	Временное сопротивление σ_B , МПа		Коэффициент прочности сварного соединения	Угол изгиба α , °	Ударная вязкость КСЧ по металлу шва, кДж/м ²
	соединение	шов			
Основной металл	370	–	1,0	68	203
Соединение СТП	354	380	0,96	175	220

Коэффициент прочности сварного соединения составляет 0,96 от прочности основного металла что следует из табл. 4. При этом временное сопротивление металла шва по своему значению превосходит временное сопротивление как основного металла, так и сварного соединения.

Разрушение сварных соединений листов сплава 1565чМ, выполненных сваркой трением с перемешиванием, происходило по зоне термомеханического воздействия со стороны отхода рабочего инструмента.

Сварные соединения листов сплава 1565чМ отличаются высокими пластическими свойствами (угол изгиба 175 °) при ударной вязкости 220 кДж/м².

Режимы сварки, представленные в табл. 3, были использованы для сварки обечаек (заготовок) газовых баллонов (лейнеров). Технология изготовления таких баллонов включает в себя следующие операции: сварка обечайки, калибровка обечайки, контроль качества шва на обечайке, осадка обечайки в горячую форму для формовки днищ, вварка штуцеров и общий контроль на герметичность.

Сварная заготовка (обечайка), выполненная на приведенных выше режимах после калибрования, представлена на рис. 1. После калибрования обечайка приобрела форму окружности в поперечном сечении. Проведенные после калибрования исследования с помощью компьютерной томографии и испытаний обечайки на герметичность не выявили появления каких-либо дефектов сварного шва, которые могли бы привести к потере герметичности.

Эксперименты по формовке днищ лейнеров за счет осадки обечайки в нагретую до 450...500 °С показали, что наблюдается интенсивное вытекание металла шва за счет

различий в деформационной способности металла шва и основного металла (рис. 2). По-видимому, это явление напрямую связано с различием в деформационной способности основного металла и металла зоны перемешивания, которые обусловлены различиями в среднем размере зерна в структуре.



а)



б)

Рис. 1. Стенд для сварки обечаек лейнеров (а) и сварная обечайка (б) после калибровки

Fig. 1. Stand for welding liner shells (a) welded shell (b) after calibration



Рис. 2. Вытекание шва СТП при осадке обечайки в горячую форму

Fig. 2. FSW weld rout when shell jumping in a hot mold

Такое поведение металла шва при горячем деформировании можно объяснить

проявлением эффекта сверхпластичности металла шва в виду наличия рекристаллизованной ультра мелкозернистой структуры. Поэтому были проведены сравнительные испытания на растяжение при повышенной температуре образцов, вырезанных из основного металла и сварного шва (рис. 3).

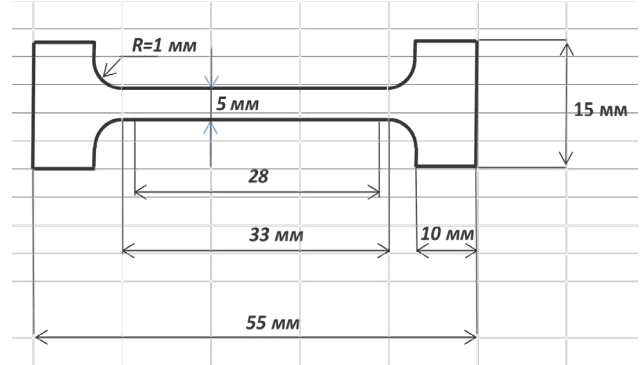


Рис. 3. Образец для испытаний на статическое растяжение основного металла 1565чМ и сварного шва при повышенных температурах

Fig. 3. Test pattern for static tensile strength of the base metal 1565chM and the weld under elevated temperatures

Результаты проведенных испытаний представлена в табл. 5.

5. Механические свойства основного металла из сплава 1565чМ и металла шва при повышенной температуре

5. Mechanical properties of the base metal of the 1565chM alloy and the weld metal under elevated temperature

Температура испытания, °С	Основной металл			Металл шва		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
20	350	165	25	370	209	28
350	42	32	77	70	67	90
400	20	14	91	39	37	139
450	10	8,0	160	22	20	275

Из приведенных в табл. 5 данных следует, что начиная с температуры 400 °С относительное удлинение металла шва существенно превосходит значение удлинения основного металла. При температуре 450 °С указанное различие достигло уже 72 %.

К сожалению, при температуре 500 °С определить искомые значения механических

свойств не удалось по причине выхода образца из металла шва при растяжении за пределы нагревательной камеры.

Внешний вид образцов основного металла и металла шва после статического растяжения при повышенной температуре приведен на рис. 4 (лист толщиной 8,0 мм).

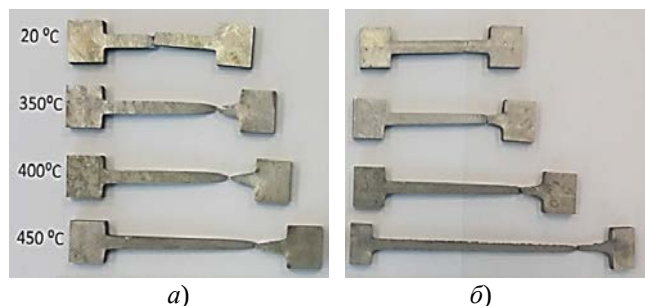


Рис. 4. Образцы сплава 1565чМ после испытаний на растяжение при различных температурах нагрева основного металла (а) и сварного шва (б)

Fig. 4. Samples of the 1565chM alloy after tensile tests at different reheat temperatures of the base metal (a) and the weld (b)

Так как при горячей деформации металла сварного шва нагревается до температуры 450...500 °С, то были проведены

эксперименты по влиянию нагрева на структуру металла шва сплава 1565чМ, полученного СТП. Для этого образцы сварных соединений подвергали нагреву с выдержкой 30 мин с последующим исследованием микроструктуры шва на оптическом микроскопе.

Фотографии макроструктур сварных соединений листов сплава 1565чМ после нагрева образцов до температуры 450...550 °С приведены на рис. 5. Проведенные эксперименты позволили установить, что при выдержке в течение 30 мин при температуре 450 °С роста зерна не происходит (см. рис. 5, б).

Дальнейшее увеличение температуры нагрева до 500 °С сопровождается началом аномального взрывной рост размера зерна в металле шва (рис. 5, в).

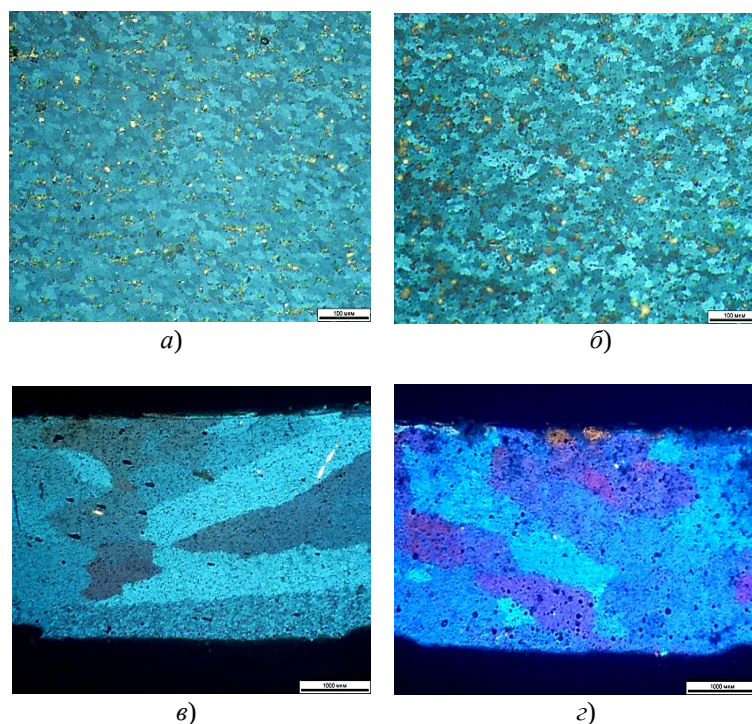


Рис. 5. Влияние отжига с выдержкой в печи в течение 30 мин на структуру металла шва листа сплава 1565чМ: а – исходное состояние (×500); б – температура нагрева 450 °С (×500); в – температура нагрева 500 °С (×25); г – температура нагрева 540 °С (×25);

Fig. 5. The annealing effect when soaking in the furnace for 30 minutes on the weld metall structure of 1565chM alloy sheet: а – initial state (×500); б – heating temperature 450 ° C (× 500); в – heating temperature 500 ° C (×25); г – heating temperature 540 ° C (×25);

Начиная с температуры нагрева 540 °С происходит аномальный рост зерна, который захватывает весь металл шва (рис. 5, г).

В дальнейшем следует провести более детальные исследования времени выдержки и

температуры нагрева на определение температурного порога начала аномального роста зерна в металле шва сплава 1565чМ.

Полученные результаты в тоже время находятся в противоречии с результатами

испытаний образцов металла сварного шва на статическое растяжение при повышенных температурах. Если бы наблюдался аномальный рост зерна у металла шва в процессе испытаний, то металла шва не проявлял бы в такой ярко выраженной степени склонность к сверхпластичности. Поэтому были проведены металлографические исследования образцов из металла шва после испытаний при температуре 500 °С. Микроструктура швов сплава 1565чМ при комнатной температуре и после испытаний при нагреве до 500 °С показана на рис. 6.

Из приведенных на рис. 6 микроструктур металла шва можно сделать вывод, что размер зерна после СТП в металле шва сплава 1565чМ составил 5,2...6,3 мкм. После испытаний при нагреве до температуры 500 °С наблюдался незначительный рост среднего размера зерна до 8,8...10,2 мкм. Но аномального роста зерна не наблюдалось.

Из полученных данных можно заключить, что спонтанному росту зерна в металле шва в процессе осадки обечаек из сплава 1565чМ в нагретую форму препятствует пластическая деформация.

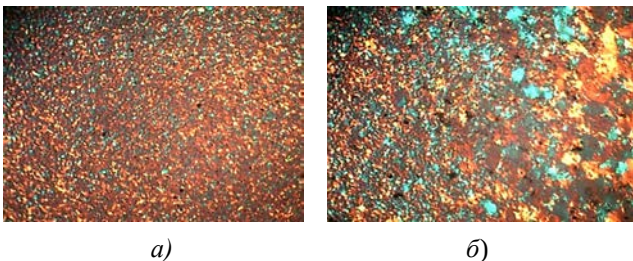


Рис. 6. Микроструктура металла шва сплава 1565чМ без нагрева (а) и после нагрева (б) до температуры 500 °С в процессе испытаний на статическое растяжение

Fig. 6. Microstructure of the weld metal of the 1565chM alloy without heating (a) and after heating (b) to a temperature of 500 °C during static tensile tests

Для обеспечения равномерной деформации сварной заготовки при ее осадке в горячую форму в дальнейшем необходимо определить соотношение между размером зерна в шве и основном металле, при котором этот процесс реализуется. Достичь необходимого соотношения между размерами зерна в шве и основном металле можно путем регулируемого повышения размера зерна в металле шва или за счет уменьшения его размера в основном металле.

Для достижения поставленной цели могут быть применены следующие методы:

- варьирование режима СТП;
- сопутствующий подогрев заготовок при СТП;
- выполнение швов двухсторонней сваркой и с использованием Бобинного инструмента;
- проведение отжига сварных соединений после сварки;
- фрикционная обработка основного металла на участке осадки сварной обечайки в горячую форму;
- использованием для изготовления сварных обечаек ультра мелкозернистого основного металла.

Заключение

1. Основной причиной возникновения эффекта вытекания металла шва при осадке сварной обечайки в горячую форму являются резкие различия в размере зерна металла шва при СТП и основного металла. При этом металл шва проявляет четко выраженную склонность к сверхпластичности.

2. Установлено, что при нагреве соединений СТП сплава 1565чМ начиная с температуры 500 °С проявляется спонтанный рост зерна. Также показано, что пластическая деформация образцов в процессе статического растяжения при повышенной температуре способствует подавлению спонтанного роста зерна в металле шва.

3. Намечены основные направления исследований для обеспечения равномерной деформационной способности основного металла и металла шва при осадке сварной обечайки из сплава 1565чМ в горячую форму.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. М.: Руда и металла, 2020. 476 с.
2. Колобнев Н.И. Алюминиево-литиевые сплавы со скандием // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 12–16.
3. Федорчук В.Е., Кушнарера О.С., Алексеенко Т.А., Фальченко Ю.В. Особенности легирования скандием металла швов сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 2014. № 5. С. 30–34.
4. Поляцкий А.Г. Особенности распределения температур в тонколистовом алюминиевом сплаве АМг5М при сварке трением с перемешиванием // Автоматическая сварка. 2011. № 8. С. 48–51.
5. Овчинников В.В. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием алюминиевых и

магниевого сплава (обзор) // Машиностроение и инженерное образование. 2016. № 4. С. 22–45.

6. **Mishra R.S., Ma Z.Y.** Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2005. Vol. 50. P. 1–78.

7. **Elangovan K., Balasubramanian V.** Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy // Materials & Design. 2008. Vol. 29. P. 362–373.

8. **Gratecap F., Racineux G., Marya S.** A simple methodology to define conical tool geometry and welding parameters in friction stir welding // International Journal of Material Forming. 2008. Vol. 1. P. 143–158.

9. **Kumar K., Kailas S.V., Srivatsan T.S.** The Role of Tool Design in Influencing the Mechanism for the Formation of Friction Stir Welds in Aluminum Alloy 7020 // Materials and Manufacturing Processes. 2011. Vol. 26. P. 915–921.

10. **Sato Y.S., Urata M., Kokawa H.** Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063 // Metallurgical and Materials Transactions A. 2002. Vol. 33. P. 625–635.

11. **Cavaliere P., Squillace A., Panella F.** Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 200. P. 364–372.

12. **Дриц А.М., Овчинников В.В., Бакшаев В.А. и др.** Влияние подачи на один оборот инструмента при сварке трением с перемешиванием на формирование и свойства швов алюминиевого сплава 1565чМ // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 10. С. 442–451.

13. **Дриц А.М., Овчинников В.В., Бакшаев В.А.** Критерии выбора параметров режима сварки трением с перемешиванием тонких листов из алюминиевого сплава 1565ч // Цветные металлы. 2018. № 1. С. 85–93.

REFERENCES

1. **Drits A.M., Ovchinnikov V.V.** Welding of aluminum alloys. Moscow: Ruda i metally, 2020, 476 p.

2. **Kolobnev N.I.** Aluminum-lithium alloys with scandium // Metal science and heat treatment, 2002, No. 7, pp. 12–16.

3. **Fedorchuk V.E., Kushnareva O.S., Alekseenko T.A., Falchenko Yu.V.** Features of scandium alloying of metal welds of welded joints of extrahigh tensile aluminum alloys // Automatic welding, 2014, No. 5, pp. 30–34.

4. **Poklyatsky A.G.** Features of the temperature distribution in thin-sheet aluminum alloy AMg5M during friction stir welding // Automatic welding, 2011, No. 8, pp. 48–51.

5. **Ovchinnikov V.V.** Technological features of friction stir welding of aluminum and magnesium alloys (review) // Machine building and engineering education, 2016, No. 4, pp. 22–45.

6. **Mishra R.S., Ma Z.Y.** Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2005. Vol. 50. P. 1–78.

7. **Elangovan K., Balasubramanian V.** Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy // Materials & Design. 2008. Vol. 29. P. 362–373.

8. **Gratecap F., Racineux G., Marya S.** A simple methodology to define conical tool geometry and welding parameters in friction stir welding // International Journal of Material Forming. 2008. Vol. 1. P. 143–158.

9. **Kumar K., Kailas S.V., Srivatsan T.S.** The Role of Tool Design in Influencing the Mechanism for the Formation of Friction Stir Welds in Aluminum Alloy 7020 // Materials and Manufacturing Processes. 2011. Vol. 26. P. 915–921.

10. **Sato Y.S., Urata M., Kokawa H.** Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063 // Metallurgical and Materials Transactions A. 2002. Vol. 33. P. 625–635.

11. **Cavaliere P., Squillace A., Panella F.** Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 200. P. 364–372.

12. **Drits A.M., Ovchinnikov V.V., Bakshaev V.A. et al** Feeding movement effect on turn of the tool during friction stir welding for the formation and properties of aluminum alloy 1565chM joints // Blank production in mechanical engineering, 2017, No. 10, pp.442–451.

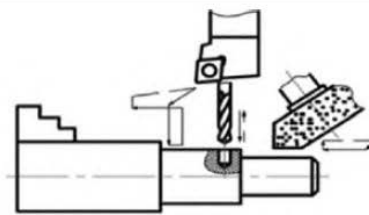
13. **Drits A.M., Ovchinnikov V.V., Baksheev V.A.** Criteria for selecting parameters of the friction stir welding mode of aluminum alloy 1565h thin sheets // Tsvetnye metally, 2018, No. 1, pp. 85–93.

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 14.10.2023; одобрена после рецензирования 03.11.2023; принята к публикации 20.11.2023.

The article was submitted 14.10.2023; approved after reviewing 03.11.2023; assepted for publication 20.11.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №1 (151). С.16-22.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №1 (151). P.16-22.

Научная статья

УДК 621.7:658.12

doi: 10.30987/2223-4608-2024-16-22

Совершенствование принципов автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки

Сергей Геннадьевич Митин¹, д.т.н.

Пётр Юрьевич Бочкарёв², д.т.н.

^{1, 2} Камышинский технологический институт – филиал Волгоградского
государственного технического университета, Камышин, Россия

² Саратовский государственный аграрный университет
им. Н.И. Вавилова, Саратов, Россия

¹ ser_gen@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6709-0424>

² bpy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

Аннотация. Рассмотрены научные принципы совершенствования системы автоматизированного планирования технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих производств. Проведено исследование современных подходов к автоматизации проектирования и реализации технологических процессов с учётом производственной ситуации. Обосновано использование системы автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов, т. к. в её методические основы заложена возможность взаимодействия в реальном времени между подсистемами проектирования и реализации технологических процессов, где ключевое место занимает база данных по технологическим возможностям оборудования и технологической оснастки. Показана взаимосвязь системы автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов с подсистемами оценки производственной технологичности, мониторинга состояния технологического оборудования, контрольно-измерительных процедур и сборки. Представлен принцип проектирования многономенклатурных технологических процессов, которые генерируются для заданной номенклатуры деталей с учётом состояния и возможностей производственной системы. Предложено использовать величину совокупного времени изготовления заданной номенклатуры деталей в качестве обобщённого критерия эффективности производственной системы. Описана методика ранжирования проектных процедур по степени влияния принятых решений на обобщённый критерий эффективности производственной системы. Описана модель на основе генетических алгоритмов, позволяющая системе автоматически подстраиваться под изменяющиеся в процессе проектирования условия. В результате повышается эффективность технологической подготовки многономенклатурного производства за счёт рационального распределения технологических операций механической обработки деталей на существующие производственные мощности. Развитие работы направлено на повышение уровня автоматизации проектирования технологических процессов и получения обратной связи о текущем состоянии производственной системы.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, автоматизация проектирования, многономенклатурные технологические процессы, САПР ТП

Для цитирования: Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю. Совершенствование принципов автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 16–22. doi: 10.30987/2223-4608-2024-16-22

The development of computer-aided planning principles for multiproduct machining processes

Sergey G. Mitin¹, D. Eng.

Peter Yu. Bochkarev², D. Eng.

^{1, 2} Kamyshtsky Technological Institute- branch of Volgograd State University Technical University,
Kamyshin, Russia

² Saratov State Agricultural University named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

¹ ser_gen@inbox.ru

² bpy@mail.ru

Abstract. The scientific principles of improving the system of automated planning of technical processes in the conditions of multiproduct machining industries are viewed. The study of modern approaches to automation of design and implementation of machining processes taking into account the production situation, is carried out. The use of the system of automated planning of multiproduct machining processes is justified, because its basic procedure includes a possibility of real-time interaction between subsystems design and implementation of technical processes, where the key place is occupied by a database on the technological capabilities of equipment and tooling. The interrelation of the system of automated planning of multiproduct machining processes with subsystems for assessing production manufacturability, monitoring technological equipment state, control and measuring procedures and assembly, is shown. The principle of designing multiproduct machining processes, generated for a given range of parts, taking into account the condition and capabilities of the production system, is presented. It is proposed to use the value of the total manufacturing time of a given range of parts as a generalized criterion for the efficiency of the production system. Ranking technique of design procedures according to the degree of influence of the decisions made on the generalized criterion of efficiency of the production system, is described. A model, based on genetic algorithms, is characterized, allowing the system being automatically adjusted to the conditions, changing during the design process. As a result, the efficiency of technological preparation of diversified production increases due to the rational distribution of manufacturing process for machining operation of parts to existing production facilities. The development of the work is aimed at increasing the level of design automation of machining processes and obtaining feedback on the current state of the production system.

Keywords: process design, design automation, multiproduct machining processes, CAD

For citation: Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. The development of computer-aided planning principles for multiproduct machining processes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 16–22. doi: 10.30987/2223-4608-2024-16-22

Введение

Современное машиностроительное производство является быстро развивающейся и постоянно меняющейся системой. Использование нового многофункционального или модернизация существующего оборудования, постоянное изменение производственного задания как по типам изготавливаемых изделий, так и по их объёмам и срокам, обуславливает необходимость разработки новых технологических процессов (ТП) механообработки. В результате современные производственные системы сочетают в себе признаки различных традиционных типов производства, что дало возможность сформулировать понятие многономенклатурного производства [1].

В многономенклатурных производственных системах ужесточаются требования к сокращению сроков технологической подготовки производства (ТПП), при этом возрастает сложность технологического проектирования, поскольку уже при проектировании ТП механообработки необходимо учитывать складывающиеся производственные условия. То есть необходимо создание системы автоматизированного планирования технологических процессов (САПлТП), способной быстро адаптироваться к изменениям производственной ситуации.

В работе [2] проанализировано состояние развития современных систем автоматизированного проектирования (САПР), исследована возможность их применения для решения задач ТПП, сделан вывод о необходимости цифровизации информационного обеспечения для поддержания актуальности справочных данных.

Структура и механизм функционирования цифровых производственных систем представлены в работе [3]. Там же описана

система адаптивного управления технологическими операциями, предложен коэффициент общей эффективности оборудования, позволяющий оценить технико-экономическую эффективность технологии механической обработки.

О необходимости решения проблемы повышения достоверности сведений о функциональных возможностях технологических методов на основе использования адаптивных самообучающихся технологических систем говорится в работе [4]. Авторы разрабатывают математические модели и алгоритмы для построения автоматизированных систем управления параметрами качества поверхностей и эксплуатационными свойствами деталей машин во время механической обработки.

Решению основной задачи управления ТПП в нестационарных условиях подготовки и режимах эксплуатации оборудования, характерных для гибких производственных систем посвящена работа [5]. Автор предлагает алгоритм и программный комплекс автоматизации ТПП, который позволяет спрогнозировать на этапе проектирования такие управляющие параметры, которые позволят в процессе производства выполнить заданные технические условия на показатели качества системы.

Обобщая вышеизложенное, обозначим в качестве цели настоящего исследования необходимость совершенствования принципов создания САПлТП, направленных на возможность взаимодействия подсистемы проектирования ТП с подсистемой реализации ТП в реальном времени и рационального распределения формируемых многономенклатурных технологических процессов на имеющиеся производственные мощности.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели были проанализированы современные подходы и разработки в области автоматизации ТПП.

Авторами работы [6] описана разработка автоматизированной системы планирования производства, включающей базу данных технологической оснастки, автоматизированную разработку технологической документации и расчёта режимов обработки деталей. Разработанная система обеспечивает параллельную работу нескольких пользователей и даёт необходимую информацию о местоположении и состоянии завершенности каждой детали, собирает информацию о фактическом времени изготовления детали, формирует задание на разработку управляющих программ, однако не решает ряд творческих задач, например, формирование рациональной структуры технологической операции.

В работе [7] предлагается методическое и информационное обеспечение для поддержки принятия технологических решений на основе формирования подмножеств альтернативного технологического оборудования, что позволяет перераспределять реализацию технологических операций в производственной системе, сокращая время освоения прогрессивных технологий на машиностроительных предприятиях.

Методы создания автоматизированных систем ТПП различаются в зависимости от видов и уровней специализации производственных систем [8]. Условиям многономенклатурного производства соответствует проблема организации специализированных производств изделий второй группы (элементов, узлов, деталей изделий, удовлетворяющих потребности человека) ввиду отсутствия полноценной информации об их конструктивном разнообразии и частоты

применения. Для решения проблемы изделия второй группы разделяются на модули функциональные технологические (МФТ) и модули функциональные обслуживающие (МФО) и создаются базы данных. В результате технология изготовления формируется на основе поиска соответствий в базах данных МФТ и МФО.

Другим перспективным методом создания автоматизированных систем проектирования и управления производством является применение искусственного интеллекта, который позволит автоматизировать трудно поддающиеся формализации творческие задачи [9]. Современное состояние развития технологий больших данных позволяет использовать нейронные сети для проектирования ТП и машинное зрение для получения обратной связи при реализации ТП. Однако первоначальное обучение нейронных сетей потребует значительных усилий, материальных и временных затрат.

Наиболее перспективным и удовлетворяющим цели исследования подходом является разработка системы автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки (САПлМТП) (рис. 1). САПлМТП представляет собой многоуровневую иерархическую систему, состоящую из страты проектирования ТП и страты реализации ТП. На страте проектирования ТП формируется множество вариантов технологических операций, которые составляют многономенклатурный ТП. На страте реализации обеспечивается взаимодействие с производственной системой для получения обратной связи, в результате чего страта проектирования получает управляющее воздействие для рационального распределения технологических операций и потоков заготовок по конкретным представителям технологического оборудования.

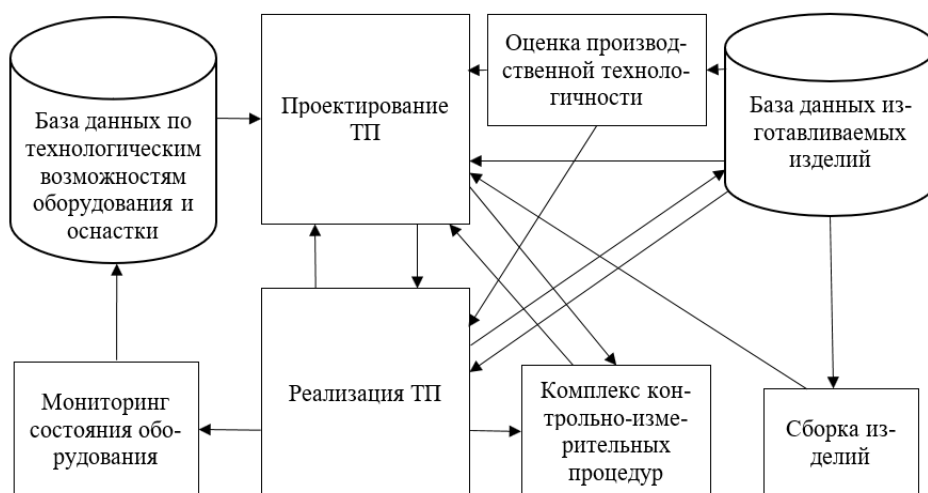


Рис. 1. Увеличенная схема САПлМТП

Fig. 1. The enlarged scheme of the SAPIMTP

Вместе с тем САПлМТП должна обеспечивать эффективное функционирование конкретной производственной системы в целом. Поэтому в работе [10] затрагиваются вопросы разработки дополнительных показателей производственной технологичности, для определения возможности изготовления конструктивных элементов деталей известными в настоящее время технологическими методами с применением имеющегося в рамках конкретной производственной системы оборудования и оснастки и определения эффективности изготовления деталей в условиях реально складывающейся производственной ситуации. В работе [11] рассмотрена методика выявления критичных требований к сборке высокоточных приборов и машин, что позволяет эффективно проводить разбиение изделия на структурные элементы и сформировать рациональные ТП с учётом требований к сборке. В работе [12] показана возможность совершенствования ТПП с применением комплекса контрольно-измерительных процедур для учёта состояния технологического оборудования, оснастки и средств технологического контроля, что позволяет минимизировать временные и материальные затраты проектного этапа.

В системах автоматизированного планирования технологических процессов принята иерархия проектных решений, в соответствии с которой выделены два проектных блока по разработке маршрутных и операционных ТП. В ходе работ по созданию подсистем проектирования технологических операций разработаны структурные модели, определены входные и выходные данные, внешние факторы, влияющие на процесс проектирования, информационные взаимодействия с другими элементами и подсистемами САПлМТП [13 – 15]. Каждый блок состоит из ряда проектных процедур, каждая проектная процедура состоит из слоёв генерации возможных вариантов, отсева нерациональных вариантов, выбора рациональных вариантов (рис. 2). Такой принцип даёт возможность оперативно реагировать на изменения в производственной ситуации, поскольку имеется возможность выбора наиболее подходящих вариантов из уже сгенерированного множества возможных.

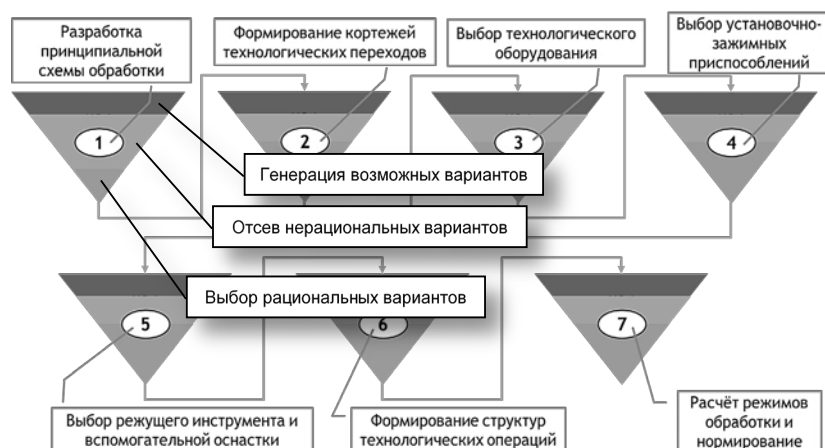


Рис. 2. Структура проектных процедур в САПлМТП

Fig. 2. The structure of design procedures in the SAPIMTP

Наличие в САПлМТП совокупности проектных процедур, в каждой из которых формируется множество возможных вариантов проектных решений, обуславливает необходимость выбора рациональных вариантов для складывающейся ситуации в конкретной производственной системе. В связи с этим появляется задача обоснования и разработки критериев оценки эффективности проектных решений, которая осложняется тем, что для конкретной производственной ситуации уровень

эффективности по каждому критерию будет различаться. Решения на слоях отсева принимаются по средним значениям показателей, рассчитанных в соответствии с определёнными в каждой проектной процедуре критериями. При этом не учитывается влияние на ранних этапах проектирования на последующие проектные процедуры и имеется вероятность отсева вариантов решений, которые впоследствии могли бы существенно повысить эффективность ТПП.

Результаты исследования

Анализируя критерии в процедурах отсева нерациональных и выбора рациональных вариантов, приходим к выводу, что в них преобладают количественные критерии, большинство из которых прямо или косвенно связаны с временем непосредственно механической обработки или временем реализации технологической операции. Следовательно, в качестве обобщённого критерия эффективности (ОКЭ) принятых решений при ТПП целесообразно использовать суммарное время обработки заданной номенклатуры деталей, поскольку именно от времени, затрачиваемого на реализацию технологических операций механообработки, зависит себестоимость изготовления [16].

Варьируя значения показателей отсева в каждой проектной процедуре и анализируя изменения по ОКЭ, появляется возможность определения рациональных уровней отсева. Однако осуществление полного перебора значений показателей отсева не представляется возможным из-за ограничений по срокам ТПП. Поэтому разработан подход, который позволяет решить задачу поиска рациональных уровней отсева в кратчайшие сроки.

В первую очередь производится оценка значимости проектных процедур. Заданный срок ТПП распределяется между проектными процедурами пропорционально влиянию на время изготовления всей номенклатуры деталей. Затем определяются рациональные уровни отсева в каждой проектной процедуре. Чем выше значимость, тем более тщательный анализ при выборе вариантов проектных решений. В результате повышается эффективность системы механообработки (сокращается суммарное время изготовления заданной номенклатуры деталей).

Значимость той или иной проектной процедуры оценивается в условных долях временных затрат от заданного срока ТПП. Для более значимых проектных процедур на этапах отсева установлены менее жёсткие условия, чтобы оставалось большее количество альтернативных вариантов для процедур поиска рациональных вариантов. Чем выше уровень отсева, тем больше вариантов остаётся после отсева. Минимально допустимый уровень отсева должен обеспечить наличие вариантов проектных решений, которые позволяют обработать заданную номенклатуру деталей.

Задача ранжирования проектных процедур относится к классу задач на анализ

чувствительности функции с несколькими аргументами. Для оценки значимости проектной процедуры необходимо рассчитать и сравнить значения ОКЭ при различных уровнях отсева в данной проектной процедуре и неизменных уровнях в остальных процедурах. Для вычисления рангов проектных процедур необходимо смоделировать работу САПЛМТП с различным содержимым множеств уровней отсева.

В результате ранжирования проектных процедур появляется возможность более тщательного анализа наиболее значимых из них. Однако определение конкретных пороговых значений критериев отсева требует создания математической модели, исключающей субъективность. В современной научной литературе, в том числе связанной с технологическим проектированием, для решения подобных задач применяются генетические алгоритмы. Этот аппарат позволяет видоизменить задачу полного перебора путём случайного подбора, комбинирования и вариации параметров подобно естественному отбору. В качестве гена выступает значение показателя отсева для каждой проектной процедуры. Хромосома представляет собой множество, состоящее из генов в соответствии с количеством проектных процедур САПЛМТП. Исходная популяция формируется из случайных наборов значений показателей в каждой проектной процедуре. Чем выше значимость проектной процедуры, тем более многочисленная популяция. После запуска механизмов скрещивания и мутаций определяются искомые значения показателей отсева.

Выполнение процедур ранжирования и определения рациональных уровней отсева для полной номенклатуры деталей вызовет значительные затраты времени, выходящие за рамки сроков ТПП. Поэтому предлагается сформировать обобщённую номенклатуру обрабатываемых деталей, для которой можно провести моделирование работы САПЛМТП, а затем, получив рациональные уровни отсева, произвести реальное проектирование для заданной номенклатуры деталей.

Для формирования обобщённой статистически обработанной номенклатуры деталей в развитие принципов унификации и типизации, заложенных в работах Соколовского А.П., Митрофанова С.П., Базрова Б.М. и др. предложен подход с использованием

кластерного анализа. Обрабатываемые детали разбиваются на элементарные обрабатываемые поверхности, информация заносится в базу данных САПЛМТП, запускается алгоритм кластерного анализа, по результатам которого формируются группы. Из каждой группы выбирается деталь-представитель и формируется обобщённая номенклатура обрабатываемых деталей, на основе которой производится моделирование работы системы проектирования и подбираются рациональные параметры генетического алгоритма. После этого с полученными параметрами осуществляется реальное проектирование для всей заданной номенклатуры деталей с зафиксированными рациональными уровнями отсева.

Заключение

Проведённое исследование позволило обосновать использование САПЛМТП для повышения эффективности современных многономенклатурных механообрабатывающих производственных систем.

Совокупность обоснованных и разработанных моделей, методик и алгоритмов приводят к совершенствованию теоретических основ создания САПЛМТП, благодаря возможности автоматизированной оценки и выбора рациональных вариантов проектных решений для складывающейся производственной ситуации.

Дальнейшее развитие исследования должно быть направлено на повышение уровня автоматизации в рамках САПЛМТП путём автоматической настройки уровней отсева и выбора рациональных вариантов решений в условиях конкретной производственной системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Шарапов С.Н., Зайцев А.В.** Определение понятия многономенклатурного производства // Справочник. Инженерный журнал. 2019. № 6(267). С. 37–42. DOI 10.14489/hb.2019.06.pp.037-042. EDN FGZPLD.
2. **Чигиринский Ю.Л.** Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 8 (110). С. 29–35. DOI 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35. EDN YUQPUL.
3. **Ингеманссон А.Р.** Цифровая производственная система для механообрабатывающего производства: структура, функционирование, программный производственно-технологический комплекс и анализ технико-экономической эффективности // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 11 (113). С. 30–39. DOI 10.30987/2223-4608-2020-11-30-39. EDN GNDDRO.

4. **Суслов А.Г., Петрешин Д.И., Федонин О.Н., Хандожко В.А.** Автоматизация управления параметрами качества поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей машин при обработке резанием // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 8(98). С. 28–36 DOI 10.30987/article_5d2635cb62fb56.07245294. EDN RFSXJZ.

5. **Иванов В. К.** К решению основной задачи управления технологической подготовкой машиностроительного производства // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 2. С. 73–78. DOI 10.25686/2542-114X.2021.2.73. EDN OLCXCN.

6. **Терехов М.В., Зайкин В.С., Аверченков А.В.** Повышение эффективности производства на основе разработки автоматизированной системы планирования производства // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2021. № 2(12). С. 49–57. DOI 10.30987/2658-6436-2021-2-49-57. EDN BQMRMX.

7. **Долгов В.А., Луцук С.В., Подкидышев А.А.** Информационная поддержка процессов освоения прогрессивных технологий на машиностроительных предприятиях // Вестник машиностроения. 2019. № 11. С. 57–61. EDN TRTXQW.

8. **Базров Б.М.** Специализация машиностроительного производства // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 8(146). С. 43–48. DOI 10.30987/2223-4608-2023-43-48. EDN BQFSIM.

9. **Михалев О.Н., Янюшкин А.С.** Метод применения искусственного интеллекта в системах автоматизированного проектирования и управления производством // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 4 (78). С. 249–255. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.78.4.049. EDN SWSYME.

10. **Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю., Бокова Л.Г.** Автоматизация оценки производственной технологичности изделий в условиях многономенклатурных производственных систем // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 9 (39). С. 44–48. EDN STBXAN.

11. **Назарьев А.В., Бочкарёв П.Ю., Митин С.Г.** Формализация стратегии выявления критичных требований к сборке при проведении технологической подготовки многономенклатурных машиностроительных производств // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 10(136). С. 42–48. DOI 10.30987/2223-4608-2022-10-42-48. EDN BOTHWO.

12. **Решетникова Е.П., Бочкарёв П.Ю.** Принципы формирования комплекса контрольно-измерительных процедур в системе автоматизированного планирования производства // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 11 (137). С. 25–31. DOI 10.30987/2223-4608-2022-11-25-31. EDN KRWWJP.

13. **Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю.** Формирование методического обеспечения автоматизированной подсистемы проектирования операций фрезерной обработки // Научные технологии в машиностроении. 2012. № 1 (7). С. 32–39. EDN OPBMJD.

14. **Разманова Т.И., Митин С. Г.** Разработка модели и основные этапы создания системы проектирования технологических процессов для оборудования сверлильной группы // Главный механик. 2015. № 4. С. 38–42. EDN TYMJQJ.

15. **Митин С.Г., Бочкарёв П.Ю.** Разработка моделей и методик автоматизации проектных процедур для проектирования технологических операций со сложной

структурой // Автоматизация в промышленности. 2018. № 2. С. 45–51. EDN XMZGST.

16. Разманов И.А., Митин С.Г., Боцкарёв П.Ю. Повышение эффективности технологической подготовки многономенклатурного производства на основе разработки системы показателей для оценки уровня проектных решений // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 9 (204). С. 132–134. EDN ZFMCDH.

REFERENCES

1. Sharapov S.N., Zaitsev A.V. Definition of the concept of diversified production // Handbook. Engineering magazine, 2019, No. 6(267), pp. 37–42. DOI 10.14489/hb.2019.06.pp.037-042. EDN FGZPLD

2. Chigirinsky Yu.L. The current state and trends in the development of technological preparation of machine-building production // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2020, No. 8 (110), pp. 29–35. DOI 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35. EDN YUQPUL.

3. Ingemansson A.R. Digital production system for mechanical engineering industry: structure, functioning, software production and technological complex and analysis of technical and economic efficiency // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2020, No. 11 (113), pp. 30–39. DOI 10.30987/2223-4608-2020-11-30-39. EDN GNDDRO.

4. Suslov A.G., Petreshin D.I., Fedonin O.N., Khandozhko V.A. Automation of control of the surface layer quality parameters and operational properties of machine parts during cutting processing // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2019, No. 8(98), pp. 28–36. DOI 10.30987/article_5d2635cb62fb56.07245294. EDN RFSXJZ.

5. Ivanov V. K. Solving the main task of process design management for machine-building production // Bulletin of the Volga State Technological University. A run of: Materials. Constructions. Technologies, 2021, No. 2. pp. 73–78. DOI 10.25686/2542-114X.2021.2.73. EDN OLKCN.

6. Terekhov M.V., Zaikin V.S., Averchenkov A.V. Improving production efficiency based on the development of an automated production planning system // Automatization and modeling in design and management, 2021, No. 2(12). pp. 49–57. DOI 10.30987/2658-6436-2021-2-49-57. EDN BQMRMX.

7. Dolgov V.A., Lutsyuk S.V., Podkidyshev A.A. Information support for the development of advanced technologies at machine-building enterprises // Bulletin of Mechanical Engineering, 2019, No. 11. pp. 57–61. EDN TRTXQW.

8. Bazrov B.M. Specialization of production in mechanical engineering // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, No. 8(146), pp. 43–48. DOI 10.30987/2223-4608-2023-43-48. EDN BQFSIM.

9. Mikhalev O.N., Yanushkin A.S. Method of applying artificial intelligence in computer-aided design and production management systems // Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University, 2022, No. 4(78). pp. 249–255. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.78.4.049. EDN SWSYME.

10. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu., Bobkova L.G. Automation of manufacturability assessment of products in conditions of multiproduct manufacturing systems // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2014, No. 9 (39). pp. 44–48. EDN STBXAN.

11. Nazariyev A.V., Bochkarev P.Yu., Mitin S.G. Formal characterization of the strategy for identifying critical assembly requirements when staging multipart machinery productions // Science-intensive technologies in machine building, 2022, No. 10(136), pp. 42–48.

12. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. Developing models for planning characterization of the measuring – and-control procedures in automated design systems of production // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, No. 11 (137), pp. 25–31. DOI 10.30987/2223-4608-2022-11-25-31. EDN KRWWJP.

13. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Formation of methodology for the automated subsystem when designing milling operations // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2012, No. 1 (7). pp. 32–39. EDN OPBMJD.

14. Rakhmanova T.I., Mitin S.G. Development of the model and the main stages of development a process design system for drilling equipment // Glavnyi mekhanik, 2015, No. 4, pp. 38–42. EDN TYMJQJ

15. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Development of models and methods of automation of design procedures for designing technological operations with a complex structure // Automation in industry, 2018, No. 2, pp. 45–51. EDN XMZGST

16. Razmanov I.A., Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Improving the efficiency of technological preparation of diversified production based on the development of a system of indicators to assess the level of design solutions // Proceedings of the Volgograd State Technical University, 2017, No. 9 (204), pp. 132–134. EDN ZFMCDH.

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 02.10.2023; одобрена после рецензирования 19.10.2023; принята к публикации 02.11.2023.

The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 27.10.2023; assepted for publication 02.11.2023.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №1 (151). С.23-29.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №1 (151). P.23-29.

Научная статья
УДК 621.91
doi: 10.30987/2223-4608-2024-23-29

Исследование влияния элементов режима и шага зубьев фрезы на технологические параметры и температурное поле процесса обработки заготовок тонкостенных деталей

Александр Николаевич Унянин¹, д.т.н.
Александр Владимирович Чуднов², аспирант
^{1, 2} ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»,
Ульяновск, Россия
¹ a_un@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>
² chudnov73ru@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. При механической обработке заготовок тонкостенных деталей температурное поле отличается от формирующегося при обработке массивных заготовок. Причина заключается в том, что при обработке тонкостенной заготовки ее поверхность, противоположная обрабатываемой, оказывает существенное влияние на температурное поле, поскольку интенсивность теплоотвода от этой поверхности в окружающую среду существенно меньше реализующегося при теплоотводе в нижележащие слои массивной заготовки. В связи с этим, актуальной является проблема назначения рационального режима процесса механической обработки заготовок тонкостенных деталей. Целью исследования является установление влияния элементов режима фрезерования заготовок тонкостенных деталей и шага зубьев фрезы на технологические параметры процесса фрезерования заготовок из титанового сплава и разработка рекомендаций по выбору режима фрезерования. Для этого было выполнено численное моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок массивных и тонкостенных деталей из титанового сплава при различных комбинациях подачи на зуб фрезы, скорости резания и шага зубьев фрезы. При обработке тонкостенной заготовки, вследствие менее интенсивного теплоотвода из зоны обработки в заготовку, температуры в зонах контакта стружки с передней поверхностью зуба, задней поверхности зуба с заготовкой и температура заготовки выше, чем при обработке массивной заготовки. Установлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей в зависимости от подачи, скорости резания и шага зубьев фрезы. При большем шаге фрезы средние и максимальные температуры в зонах контакта стружки с передней поверхностью зуба и задней поверхности зуба с заготовкой ниже при большинстве используемых комбинациях элементов режима. Получены уравнения, устанавливающие влияние подачи на зуб фрезы, скорости резания и шага зубьев на параметры процесса обработки. Результаты исследования позволят выбрать рациональный режим фрезерования и шаг зубьев при обработке заготовок тонкостенных деталей из титанового сплава.

Ключевые слова: фрезерование, температурное поле, режим резания, тонкостенная деталь, заготовка.

Для цитирования: Унянин А.Н., Чуднов А.В. Исследование влияния элементов режима и шага зубьев фрезы на технологические параметры и температурное поле процесса обработки заготовок тонкостенных деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2024-23-29

Investigation of mode elements effect and the influence of milling cutter teeth space on technological parameters and temperature field of work on a thin-walled parts workpiece

Alexander N. Unyanin¹, D. Eng.
Alexander V. Chudnov², PhD student
^{1, 2} Ulyanovsk State Technical University,
Ulyanovsk, Russia
¹ a_un@mail.ru
² chudnov73ru@yandex.ru

Abstract. When machining workpieces of thin-walled parts, the temperature field differs from the field, which is formed during massive workpieces treatment. The reason for this is that machining of a thin-walled billet is interfered with its surface, being opposite to the one under machining. It has a significant effect on the temperature field, since the intensity of heat removal from this surface into the environment is significantly less than heat removal into the underlying layers of a massive material blank. In this regard, the

problem of finding a rational mode of the machining process of thin-walled workpieces is relevant. The aim of the study is to determine the effects of the elements of the milling mode of thin-walled workpieces and milling cutter teeth space on the technological parameters of the milling process of titanium alloy workpieces and to develop recommendations for choosing this milling mode. For this purpose, a numerical modeling of the technological parameters of the milling process of blanks of massive workpieces and thin-walled parts made of titanium alloy, was performed experiencing various combinations of feed to the milling cutter tooth, cutting speed and milling cutter teeth space. When machining a thin-walled workpiece, due to less intense heat removal from the cutting zone into the workpiece, the temperatures in the areas of chip contact with the front surface of the tooth, the back surface of the tooth with the workpiece and the temperature of the workpiece itself are higher than when in a massive workpiece treatment. The patterns of changes in the parameters of the milling process of thin-walled workpieces depending on the feed, cutting speed and the milling cutter teeth space are established. With a larger tool stepover, the average and maximum temperatures in the areas of chip contact with the front surface of the tooth and the back surface of the tooth with the workpiece are lower in most of the combinations of mode elements used. Equations that establish the effect of feed on the milling cutter tooth, cutting speed and spacing of teeth on the parameters of the machining are obtained. The results of the study will allow choosing a rational milling mode and spacing of teeth in the work on workpieces of thin-walled parts made of titanium alloy.

Keywords: milling, temperature field, cutting mode, thin-walled part, workpiece

For citation: Unyanin A.N., Chudnov A.V. Investigation of mode elements effect and the influence of milling cutter teeth space on technological parameters and temperature field of work on a thin-walled parts workpieces / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2024-23-29

Перспективным направлением повышения эффективности обработки заготовок тонкостенных деталей является использование фрез с неравномерным шагом зубьев, позволяющих существенно снизить уровень вынужденных колебаний, возникающих в процессе обработки. Шаг зубьев оказывает влияние на силы резания, трения и температурное поле. Однако влияние шага на данные параметры процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей не установлено.

Температурное поле при механической обработке заготовок тонкостенных деталей, отличается от поля, формирующегося при обработке заготовок деталей значительной толщины («массивных» заготовок), поскольку при обработке тонкостенных заготовок ее поверхность, расположенная напротив обрабатываемой, оказывает существенное влияние на параметры процесса, в том числе на температурное поле. Это связано с более низким уровнем теплоотвода от необрабатываемой поверхности, поскольку интенсивность теплоотвода от этой поверхности в окружающую среду существенно меньше того, который реализуется при теплоотводе в нижележащие слои массивной заготовки [1, 2].

Обеспечить работоспособность инструмента и параметры качества заготовок тонкостенных деталей возможно за счет назначения рационального режима обработки и шага зубьев фрезы, однако соответствующие рекомендации отсутствуют [3, 4].

Цель исследования – установление влияния шага зубьев при различных комбинациях элементов режима фрезерования заготовок тонкостенных деталей из титанового сплава на теплосиловую напряженность процесса.

Силы резания и трения рассчитывали по преобразованным зависимостям, предложенным в

работах [5, 6]. Силы зависят от предела текучести материала заготовки при температуре ее деформируемого слоя: $\sigma_{st} = f(T_g)$, где T_g – температура деформируемого слоя материала заготовки. Мощности и плотности источников тепловыделения в зоне деформирования и в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой рассчитывали, используя зависимости [7, 8].

Для расчета параметров процесса использовали программное обеспечение, реализующее расчет температурного поля с применением метода конечных элементов. При расчете определяются температура деформируемого слоя материала заготовки T_g и предел текучести материала заготовки σ_{st} при этой температуре. Параметр σ_{st} является аргументом зависимостей для расчета сил трения и главной составляющей силы резания P_z , при этом рассчитывали силы, приходящиеся на 1,0 мм высоты зуба фрезы.

Выполнили численное моделирование параметров процесса фрезерования заготовок из титанового сплава ВТ6 цилиндрической поверхностью концевой фрезы из твердого сплава Т5К10 диаметром 20 мм. Параметры процесса фиксировали при диспергировании заготовки 25-м из последовательно работающих зубьев фрезы. Моделировали процесс охлаждения зоны резания смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ), приняв коэффициент теплоотдачи от контактирующих с СОЖ поверхностей, равным 5000 Вт/(м²·К); коэффициент теплоотдачи поверхностей, контактирующих с воздухом, приняли равным 40 Вт/(м²·К) [9, 10].

Моделировали процесс фрезерования массивной заготовки толщиной 10 мм, а также тонкостенной толщиной 0,7 мм. Варьировали элементами режима: подачей на зуб фрезы $s_z = 0,11$ и $0,16$ мм/зуб;

скоростью резания $v = 120$ и 150 м/мин; шагом зубьев $t_z = 12,6$ и $25,2$ мм [11].

Параметры процесса фиксировали в последний момент времени контакта зуба фрезы с заготовкой (это время зависит от элементов режима фрезерования) и в момент времени, предшествующий последнему на 8×10^{-5} с. В нижеприведенных таблицах представлены результаты, зафиксированные в предпоследний момент времени (числитель) и в последний момент времени контакта зуба с заготовкой (знаменатель).

Результаты расчета параметров процесса обработки «массивной» заготовки толщиной 10 мм

фрезой с различным шагом зубьев и тонкостенной заготовки толщиной $0,7$ мм фрезой с шагом зубьев $t_z = 12,6$ мм представлены в табл. 1 и табл. 2. Поскольку использованы одинаковые глубина резания и подача на зуб фрезы ($s_z = 0,16$ мм/зуб; $v = 150$ м/мин; $t = 0,3$ мм; $v_s = 1,91$ м/мин), то параметры процесса, характеризующие его кинематику, одинаковы и составляют: максимальная глубина внедрения зуба в заготовку $a_{max} = 39,1$ мкм; длина траектории контакта зуба с заготовкой $l_K = 2,46$ мм; максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба $l = 125,8$ мкм.

1. Параметры процесса фрезерования при различном шаге зубьев и размерах (толщинах) заготовки

1. Milling process parameters with different teeth distance and various dimensions (thickness) of the workpiece

Размер (толщина) заготовки, мм	Шаг t_z , мм	Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба F_1 , Н	Сила трения зуба о заготовку F_2 , Н	Главная составляющая силы резания P_z , Н	Мощность источника тепловыделения, Вт, в зоне		
					деформирования W_g	контакта стружки с зубом W_1	контакта зуба с заготовкой W_2
10	12,6	38,9/45,3	54,2/54,9	99,3/107,5	77,0/89,9	58,4/68,0	162,6/164,7
10	25,2	39,1/45,3	54,5/54,9	99,9/107,5	77,4/89,9	58,7/68,0	163,5/164,6
0,7	12,6	38,8/45,2	54,0/54,7	99,0/107,2	76,7/89,6	58,1/67,8	162,0/164,1

Примечания: F_1 , F_2 , P_z – силы, приходящиеся на $1,0$ мм высоты зуба фрезы.

2. Температуры при различном шаге зубьев и размерах (толщинах) заготовки

2. Temperatures at different spacing of teeth and various dimensions (thickness) of the workpiece

Размер (толщина) заготовки, мм	Шаг t_z , мм	Средняя температура в зоне контакта		Температура деформируемого слоя материала заготовки T_g , К	Предел текучести материала заготовки σ_{st} , МПа	Температура заготовки T_3 , К, на расстоянии от обрабатываемой поверхности, мкм	
		зуба с заготовкой T_2 , К	стружки с зубом T_1 , К			30	180
10	12,6	960/981	960/968,5	370/346	782/792	490/479	393/394
10	25,2	955/974	954/964	358/346	787/792	472/462	382/383
0,7	12,6	966/987	963/970	376/351	779/790	502/491	409/410

При обработке массивной заготовки фрезой с большим значением шага зубьев материал заготовки в перерыве между работой последовательно работающих зубьев остывает более продолжительное время, поэтому температура деформируемого слоя материала заготовки T_g ниже, чем при обработке фрезой с меньшим значением шага. Это является причиной увеличения предела текучести материала заготовки σ_{st} , сил трения и резания, мощностей и плотностей источников тепловыделения. Однако варьирование шагом не приводит к значительному изменению этих параметров при обработке массивных заготовок. Поскольку при большем значении шага зубья вступают в контакт с материалом заготовки, имеющим меньшую

температуру, поэтому средние и максимальные температуры в зонах контакта зуба с заготовкой и стружкой и температура поверхностного слоя заготовки на расстоянии 30 мкм от обрабатываемой поверхности ниже на $17...18^\circ$.

При обработке тонкостенной заготовки, вследствие менее интенсивного теплоотвода из зоны обработки в заготовку, температуры в зонах контакта стружки с передней поверхностью зуба, задней поверхности зуба с заготовкой и в зоне деформирования выше, чем при обработки массивной заготовки. Увеличение температуры деформируемого слоя материала заготовки T_g приводит к снижению предела текучести материала тонкостенной заготовки σ_{st} . Поэтому

при фрезеровании тонкостенных заготовок несколько ниже силы трения и составляющая силы резания P_z и мощности источников тепловыделения. Однако вследствие менее интенсивного теплоотвода из зоны обработки заготовок тонкостенных деталей контактные температуры несколько выше, чем при обработке массивной (см. табл. 1 и табл. 2). В большей степени увеличиваются температуры заготовки, причем чем больше расстояние от обрабатываемой поверхности,

тем больше разность температур в массивной и тонкостенной заготовке.

План численного моделирования параметров процесса обработки заготовок тонкостенных деталей при варьировании элементами режима и шагом зубьев фрезы приведён в табл. 3. В табл. 4 – 6 представлены результаты расчета параметров процесса фрезерования заготовки толщиной 0,7 мм.

3. План численного моделирования

3. Computational simulation plan

Номер эксперимента	Варьируемые параметры			
	Подача на зуб фрезы s_z , мм/зуб	Скорость резания v , м/мин	Шаг фрезы t_z , мм	Скорость подачи v_s , м/мин
1	0,11	120	12,6	1,05
2	0,16	120	12,6	1,52
3	0,11	150	12,6	1,31
4	0,16	150	12,6	1,91
5	0,11	120	25,2	0,52
6	0,16	120	25,2	0,76
7	0,11	150	25,2	0,66
8	0,16	150	25,2	0,96

4. Технологические параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и шаге зубьев

4. Technological parameters of the milling process with various elements of the mode and spacing of teeth

Номер эксперимента	Максимальная глубина внедрения зуба в заготовку $a_{\max}$, мкм	Максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l , мкм	Температура деформируемого слоя материала заготовки T_g , К	Предел текучести материала заготовки σ_{st} , МПа
1	26,8	76,5	385/366	776/784
2	39,0	125,8	376/354	779/789
3	26,8	86,2	388/365	774/784
4	39,0	125,8	376/351	779/790
5	26,8	86,2	383/372	776/781
6	39,0	125,4	373/361	780/785
7	26,8	86,2	384/371	776/781
8	39,0	125,8	375/361	780/786

5. Параметры процесса фрезерования при различных элементах режима и шаге зубьев фрезы

5. Parameters of the milling process with different elements of the mode and tool stepover

Номер эксперимента	Сила трения стружки о переднюю поверхность зуба F_1 , Н	Сила трения зуба о заготовку F_2 , Н	Главная составляющая силы резания P_z , Н	Мощность источника тепловыделения, Вт, в зоне		
				деформирования W_g	контакта стружки с зубом W_1	контакта зуба с заготовкой W_2
1	28,0/31,5	53,8/54,4	86,2/90,8	46,0/51,8	35,0/39,4	134,4/135,8
2	38,4/45,0	54,0/54,7	98,8/106,9	63,7/74,3	48,3/56,2	135,0/136,6
3	28,0/31,5	53,7/54,3	86,0/90,8	55,1/62,2	41,9/47,2	161,0/163,0
4	38,8/45,2	54,0/54,7	99,0/107,2	76,7/89,6	58,2/67,8	162,0/164,1
5	28,0/31,3	53,8/54,1	86,2/90,4	46,0/54,5	35,0/39,1	134,5/135,3
6	38,7/44,8	54,1/54,4	98,9/106,4	63,8/74,0	48,4/56,0	135,2/136,1
7	28,0/31,4	53,8/54,1	86,2/90,5	55,2/62,0	42,0/47,1	161,3/162,4
8	38,8/45,0	54,0/54,4	99,0/106,6	76,8/89,1	58,2/67,5	162,1/163,3

Примечания: F_1 , F_2 , P_z – силы, приходящиеся на 1,0 мм высоты зуба фрезы

6. Температуры при различных элементах режима фрезерования и шаге зубьев фрезы

6. Temperatures at various elements of the milling mode and teeth distance of the milling cutter

Номер эксперимента	Температура в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 , К		Температура в зоне контакта стружки с зубом T_1 , К		Температура на вершине зуба фрезы T_E , К	Температура заготовки T_3 , К
	средняя	максимальная	средняя	максимальная		
1	967/972	1282/1288	874/871	961/961	1025/1017	532/525
2	922/936	1301/1317	959/934	1277/1290	1019/1010	506/496
3	1042/1052	1462/1475	946/958	1305/1312	1036/1025	539/531
4	966/987	1441/1467	963/970	1384/1403	1013/1001	502/491
5	980/987	1314/1321	921/922	1206/1210	1038/1034	521/514
6	917/931	1297/1312	925/931	1273/1286	1013/1009	495/485
7	1036/1045	1459/1470	952/955	1300/1307	1028/1023	522/514
8	963/982	1441/1462	958/968	1381/1399	1005/1000	492/482

Примечания: температура заготовки T_3 определена на расстоянии 30 мкм от обрабатываемой поверхности

При увеличении подачи s_z с 0,11 до 0,16 мм/зуб (на 45 %) увеличиваются максимальная глубина внедрения зуба в заготовку $a_{\max}$ с 26,8 до 39,0 мкм и максимальная длина контакта стружки с передней поверхностью зуба l (в среднем на 45 %). Увеличение параметров $a_{\max}$ и l приводит к увеличению силы трения F_1 и главной составляющей P_z силы резания на 35...43 % и 17...18 % соответственно. На силу трения зуба о заготовку F_2 подача влияет незначительно. Вследствие увеличения сил F_1 и P_z увеличиваются мощности источников тепловыделения в зонах контакта стружки с зубом W_1 и в зоне деформирования W_g ; мощность источника тепловыделения в зоне контакта зуба с заготовкой W_2 увеличивается незначительно.

Плотности всех источников тепловыделения увеличиваются при увеличении подачи в малой степени, поскольку изменяются не только мощности источников тепловыделения, но и их площади. Средние температуры в зоне контакта зуба с заготовкой T_2 , температура на вершине зуба фрезы T_E и температура заготовки T_3 почти во всех случаях незначительно уменьшаются с увеличением подачи (на 5...12 %). Это можно объяснить уменьшением времени нахождения заготовки напротив источника тепловыделения при незначительном увеличении плотностей источников тепловыделения. Средняя и максимальная температуры в зоне контакта стружки с зубом T_1 увеличиваются с увеличением подачи.

При увеличении скорости резания v от 120 до 150 м/мин, т. е. на 25 %, увеличиваются мощности всех источников тепловыделения, средние и максимальные температуры T_1 и T_2 . Следовательно, с увеличением скорости

резания v увеличивается температура поверхностного слоя заготовки.

На кинематические параметры процесса фрезерования – длину траектории контакта зуба с заготовкой l_k , максимальную глубину внедрения зуба в заготовку $a_{\max}$ и максимальную длину контакта стружки с передней поверхностью зуба l скорость резания влияния не оказывает.

При изменении шага зубьев фрезы t_z эти параметры также не изменяются, поскольку подача на зуб фрезы одинакова.

При увеличении шага уменьшается температура деформируемого слоя материала заготовки T_g в предпоследний момент времени контакта зуба с заготовкой. При обработке массивной заготовки T_g снижается в этот момент времени на 11,5 °; при обработке тонкостенной в меньшей степени – на 2,0...4,0 °. В последний момент времени работы зуба фрезы с большим шагом T_g выше на 5,0...10 °, чем с меньшим шагом. Это можно объяснить меньшей интенсивностью отвода теплоты при обработке тонкостенной заготовки.

Поэтому предел текучести материала заготовки σ_{st} в предпоследний момент времени выше при обработке фрезой с большим шагом. Однако разница температур гораздо меньше, чем при обработке массивных заготовок. В последний момент времени работы зуба параметр σ_{st} выше, при обработке фрезами с меньшим шагом.

Поэтому силы трения и резания и мощности источников тепловыделения несколько выше в предпоследний момент при обработке фрезой с большим шагом. В последний момент времени работы фрезы эти параметры для фрез с большим шагом ниже, однако разница не существенная.

Поэтому при большем шаге фрезы средние и максимальные температуры T_1 и T_2 и температура на вершине зуба фрезы T_E оказались ниже при всех используемых комбинациях элементов режима, кроме $s_z = 0,11$ мм/зуб и $v = 120$ м/мин.

При обработке фрезой с шагом фрезы $t_z = 25,2$ мм температура заготовки T_3 на расстоянии 30 мкм от обрабатываемой поверхности ниже, чем фрезой с шагом $t_z = 12,6$ мм.

Как и при обработке массивной заготовки, сила P_z , а также максимальные и средние температуры T_1 и T_2 в последний момент времени работы зуба выше, чем в предшествующий. Температура на вершине зуба фрезы T_E и температура заготовки T_3 ниже в последний момент контакта зуба с заготовкой. Поэтому нижеприведенные зависимости для расчета параметра P_z , а также средних температуры T_1 и T_2 получены для последнего момента времени работы зуба; для расчета параметров T_E и T_3 – для предыдущего.

Поскольку справочники и рекомендации содержат данные по условиям и режиму обработки массивных заготовок, при обработке тонкостенных заготовок следует использовать шаг зубьев и режим, обеспечивающие одинаковые или меньшие силы и температуры, чем при обработке массивной заготовки, при максимальной производительности.

Например, если производить обработку заготовок тонкостенных деталей фрезой с шагом $t_z = 25,2$ мм с режимом $s_z = 0,16$ мм/зуб и $v = 150$ м/мин (эксперимент № 8, см. табл. 3), то сила P_z , а также максимальные и средние температуры T_1 и T_2 и температуры T_E и T_3 ниже, чем при обработке массивной заготовки фрезой с шагом $t_z = 25,2$ мм. Однако производительность обработки тонкостенной заготовки со скоростью подачи $v_s = 0,96$ м/мин будет ниже, чем массивной ($v_s = 1,91$ м/мин) в два раза.

Если при обработке заготовок тонкостенных деталей использовать условия эксперимента № 2 по табл. 3 (фреза с шагом $t_z = 12,6$ мм; $s_z = 0,16$ мм/зуб; $v = 120$ м/мин), то производительность обработки тонкостенной заготовки со скоростью подачи $v_s = 1,52$ м/мин будет ниже, чем массивной ($v_s = 1,91$ м/мин), на 20 %. При этом максимальные и средние температуры T_1 , T_2 и температура T_E ниже, чем при обработке массивной заготовки. Однако температура заготовки на расстоянии 30 мкм от обрабатываемой поверхности выше, чем в массивной.

Для определения рационального режима можно использовать нижеприведенные зависимости, полученные в результате обработки результатов численного моделирования:

$$\begin{aligned}T_1 &= 934,2 + 10820s_z + 748,4v + 69,032t_z - 4240s_zv - 434,9s_zt_z - 27,78vt_z + 174,6s_zvt_z; \\T_2 &= 135,4 + 3760s_z + 428,4v + 27,032t_z - 2040s_zv - 171,4s_zt_z - 11,17vt_z + 69,841s_zvt_z; \\T_E &= 538,6 + 3140s_z + 222,4v + 24,286t_z - 1440s_zv - 150,8s_zt_z - 9,968vt_z + 60,317s_zvt_z; \\T_3 &= 389,8 + 920s_z + 105,2v + 5,92t_z - 720s_zv - 44,44s_zt_z - 3,397vt_z + 22,22s_zvt_z; \\P_z &= 56,84 + 316s_z - 0,64v - 0,046t_z + 4s_zv - 0,16s_zt_z + 0,016vt_z.\end{aligned}$$

По этим зависимостям можно рассчитать режим, при котором технологические параметры при обработке тонкостенной заготовки не превысят допустимые значения.

Выводы

1. Установлено, что при фрезеровании заготовок тонкостенных деталей температурное поле значительно отличается от формирующегося при обработке массивных заготовок.

2. Установлены закономерности изменения параметров процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей, в зависимости от подачи, скорости резания и шага зубьев фрезы.

3. Получены математические зависимости, устанавливающие взаимосвязь температур с элементами режима фрезерования и шагом зубьев фрезы.

4. Результаты исследования позволят выбрать рациональный режим фрезерования и шаг зубьев при обработке заготовок тонкостенных деталей из титанового сплава.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Худобин Л. В. Шлифование заготовок клиновидных изделий / Л. В. Худобин, А. Ш. Хусаинов / Под общ. ред. Л. В. Худобина. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 249 с.
2. Shigeki O. Study on the geometrical accuracy in surface grinding. Thermal deformation of workpiece in traverse grinding / O. Shigeki, N. Tokuhiko, H. Shinsaki // International journal Japanese society precision engineering. 1994. Vol. 28. № 4. P. 305–310.
3. Киселёв Е.С., Имандинов Ш.А., Назаров М.В. Особенности обеспечения качества нежестких алюминиевых заготовок при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 12 (207). С. 14–17.
4. Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С. Проблема технологических деформаций при фрезерной обработке тонкостенных заготовок // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21. № 3. С. 17–27. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27.

5. **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 реза // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 56–61.

6. **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.

7. **Резников А.Н.** Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.

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

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

10. **Жилыев А. С., Кугультинов С. Д.** Математическое моделирование тепловых процессов при фрезеровании сложнопрофильных деталей из алюминиевых сплавов // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей 2019. №2. С. 65–69.

11. **Балякин А.В., Хаймович А.И., Чемпинский Л.А.** Моделирование режима высокоскоростного фрезерования титанового сплава VT-9 // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т.15. № 6. С. 572–583.

REFERENCES

1. Khudobin L. V. Grinding blanks of wedge-shaped products / L. V. Khudobin, A. Sh. Khusainov / Under the general editorship of L. V. Khudobin. Ulyanovsk: UISTU, 2007, 249 p.

2. Shigeki O. Study on the geometrical accuracy in surface grinding. Thermal deformation of workpiece in traverse grinding / O. Shigeki, N. Tokuhiko, H. Shinsaki // International journal Japanese society precision engineering. 1994. Vol. 28. № 4. P. 305–310.

3. Kiselev E.S., Imandinov Sh.A., Nazarov M.V. Quality assurance features of non-rigid aluminum blanks when milling with ultrasonic vibrations. Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, No. 12, pp. 14–17.

4. Ereimekin P.A., Zhargalova A.D., Gavryushin S.S. The problem of technological deformations during milling of thin-walled workpieces // Metal processing (technology, equipment, tools). 2019, vol. 21, No. 3, pp. 17–27. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-17-27.

5. Vorontsov A.L., Sultan-Zadeh N.M., Albagachiev A.Yu. Mathematical description of the formation of various types of the chips, pulsation of cutting force, as well as parameters of contact between the processed surface of the workpiece and the back surface of the tool / Vestnik mashinostroeniya, 2008, No. 7, pp. 56–61.

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

7. Reznikov A.N. Thermal processes in technological systems / A. N. Reznikov, L. A. Reznikov. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 288 p.

8. Unyanin A.N. The research of a temperature field when turning with the superposition of ultrasonic vibrations // Bulletin of RSATU named after P.A. Soloviev, 2017, No.2(41), pp. 220–235.

9. Unyanin A.N., Semdyankin I.V. Modeling of the temperature field during milling blanks of thin-walled parts // Innovations in mechanical engineering: collection of works of the 12-th int. scientific and practical. conf. Novosibirsk: Iz-vo NSTU, 2021, pp.59–66.

10. Zhilyaev A. S., Kugultinov S. D. Mathematical modeling of thermal processes during milling of complex profile parts made of aluminum alloys // Bulletin of the Concern of East Kazakhstan Al-maz-Antey, 2019, No.2, pp. 65–69.

11. Balyakin A.V., Khaimovich A.I., Champinsky L.A. Modeling of the mode of high-speed milling of titanium alloy VT-9 // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2013, vol. 15, No. 6, pp. 572–583.

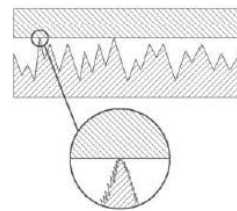
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

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 03.08.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 19.09.2023.

The article was submitted 03.08.2023; approved after reviewing 12.09.2023; accepted for publication 19.09.2023.



Научная статья

УДК 621.924.56

doi: 10.30987/2223-4608-2024-30-40

Влияние микрогеометрических параметров сферической поверхности ролика на звуковое давление и вибрацию подшипника

Владимир Андреевич Носенко¹, д.т.н.

Александр Владимирович Зуев², главный конструктор

Владимир Евгеньевич Орлянский³, начальник КО

¹ ВПИ (филиал) ВолгГТУ, Волгоградская обл., Волжский, Россия

² ОАО «ЕПК Волжский», Волгоградская обл., Волжский, Россия

³ НТЦ ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия

¹ vladim.nosenko2014@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>

² a.zuev@epkgroup.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3743-1138>

³ vladimir.orlyanskiy@kamaz.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3570-1455>

Аннотация. В производственных условиях ОАО «ЕПК Волжский» показана возможность повышения вибрационного разряда подшипников с коническими роликами в результате использования роликов из общего производственного потока с заданными микрогеометрическими параметрами сферической поверхности. Сфера формируется на операции совмещенного чернового, чистового и окончательного шлифования сборным абразивным инструментом из трех кругов различных характеристик. Установлено, что в подшипнике при последовательной замене роликов, шероховатость сферы которых изменяется в интервале $0,10 < Ra \leq 0,20$ мкм на ролики с шероховатостью $Ra \leq 0,10$ мкм среднее значение микрогеометрических параметров сферы роликов в подшипниках (Ra , волнистость W , отклонение от круглости Δ) снижаются в 2,4 – 4,3 раза. Проведена оценка влияния комплекта роликов подшипника с различными параметрами микрогеометрии сферического торца ролика на звуковое давление и вибрацию подшипника. Установлено, что с увеличением количества роликов с микрогеометрическими параметрами сферы ближе к нижней границе поля допуска значения общего уровня вибрации, уровня вибрации в третьей полосе частот и уровень звукового давления подшипника улучшаются. Выполнен статистический анализ данных параметров. Определены значимость анализируемых факторов и условия повышения вибрационного разряда подшипника при обеспечении режимов обработки в рамках действующего технологического процесса. Установлены корреляционная и функциональные связи между средними значениями микрогеометрических параметров сфер роликов в подшипниках и параметрами звукового давления и вибрации.

Ключевые слова: подшипник, конический ролик, шлифование сферы, микрогеометрия, вибрации, звуковое давление

Для цитирования: Носенко В.А., Зуев А.В., Орлянский В.Е. Влияние микрогеометрических параметров сферической поверхности ролика на звуковое давление и вибрацию подшипника // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 30–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-30-40

Microgeometric parameters effect of the spherical roller surface on bearing sound pressure and vibration

Vladimir A. Nosenko¹, D. Eng.

Alexander V. Zuev², Chief Designer

Vladimir E. Orlyansky³, CD manager

¹ VPC (branch) VolgSTU, Volgograd region, Volzhsky, Russia

² JSC UPC Volzhsky, Volgograd region, Volzhsky, Russia

³ STC of KAMAZ PJSC, Naberezhnie Chelni, Russia

¹ vladim.nosenko2014@yandex.ru

² a.zuev@epkgroup.ru

³ vladimir.orlyanskiy@kamaz.ru

Abstract. In a production environment of JSC UPC Volzhsky it is shown how to increase the vibration discharge of bearings with conical rollers due to the use of rollers with the specified microgeometric parameters of the spherical surface made in the general production flow. The sphere is formed under the combination of rough grinding, finish grinding and final grinding using an assembled abrasive tool consisting of three rolls of various characteristics. It was found that in a bearing, with sequential replacement of rollers, where sphere roughness varies in the range of $0.10 Ra \leq 0.20$ microns for rollers with roughness $Ra \leq 0.10$ microns, the average value of the microgeometric parameters of the roller sphere in bearings (Ra , undulation W , deviation of circularity Δ) decreases by 2,4 – 4,3 times. The impact assessment of bearing rollers set having different parameters of the microgeometry of the spherical roller end on the sound pressure and vibration of the bearing was carried out. It was found that with an increase in the number of rollers with microgeometric parameters of the sphere closer to the lower edge of the tolerance field, the values of the overall vibration level, the vibration level in the third frequency band and the sound pressure level of the bearing improved. A statistical analysis of these parameters was carried out. The significance of the analyzed factors and conditions for increasing the vibration discharge of the bearing while ensuring processing modes within the framework of the current technological process are determined. Correlation and functional relationships between the average values of the microgeometric parameters of rollers spheres in bearings and the parameters of sound pressure and vibration were found.

Keywords: bearing, conical roller, spherical grinding, microgeometry, vibrations, sound pressure.

For citation: Nosenko V.A., Zuev A.V., Orlyansky V.E. Microgeometric parameters effect of the spherical roller surface on bearing sound pressure and vibration / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 30–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-30-40

Введение

С развитием отечественного автомобилестроения появляется необходимость к снижению шума и вибрации узлов транспортных средств, в том числе подшипников, входящих в их состав. Подшипники используются во множестве автомобильных узлов (ступицы, коробки передач, ведущие мосты) и качество их изготовления во многом определяет гарантийные сроки эксплуатации машины. Повышение комфорта водителя и пассажиров, наряду с обеспечением требований законодательства по защите от вредного воздействия вибрации и шума, являются актуальной задачей. Вибрационные параметры подшипников, в отличие от статических, например, температуры, являются носителями динамических характеристик технического состояния [1]. Инструментальный метод контроля вибрации и шума в

процессе производства используется для комплексной оценки соответствия параметров подшипников требованиям конструкторской документации [2], а в процессе эксплуатации является вспомогательным диагностическим признаком при планировании технического обслуживания машин и механизмов [3 – 5], позволяющим выявить дефект до того, как произойдет отказ изделия [6].

Существенное влияние на образование вибраций подшипников оказывают микрогеометрические параметры деталей, входящих в его состав. В работе [7] описаны методы определения неисправностей роликовых подшипников на основе анализа параметров вибрации и звукового давления с последующим определением причин их возникновения, в том числе, на роликах или кольцах. Влияние геометрических размеров ролика на вибрации подшипника рассмотрено в работах [8, 9],

микрогеометрических параметров, такие как волнистость дорожек качения колец – в работах [10, 11]. Существенное влияние на вибрации подшипника оказывают шероховатость, волнистость и форма профиля поверхности упорного борта внутреннего кольца подшипника, контактирующего со сферой ролика, волнистость дорожки качения внутреннего кольца подшипника [12, 13]. Уровень вибраций зависит от соотношения количества волн на поверхности дорожки качения кольца с числом роликов в подшипнике [12]. Установлено, что с увеличением шероховатости сферы ролика уровень шума и вибрации подшипника возрастают [14]. Для определения источников повышенной вибрации конического подшипника в дополнении к измерению общего уровня вибраций рассмотрены вибрации в трех диапазонах частот, что позволяет определить более узкий диапазон частот, в котором происходят наиболее значимые изменения [15].

Литературный анализ позволяет сделать следующие основные выводы: вибрационные показатели относятся к числу важнейших динамических показателей подшипника, узлов и изделий, где данный подшипник установлен; уровень вибраций и шума подшипника зависят от большого количества факторов, в том числе, от качества изготовления деталей подшипника, что во многом определяется микрогеометрическими параметрами обработанных поверхностей. Одними из факторов, влияние которых рассмотрено в меньшей степени, являются микрогеометрические параметры сферы роликов конических подшипников, что и определило цель работы: исследование влияния микрогеометрических параметров сферы ролика на уровни вибраций и звукового давления конического подшипника.

Методика исследований

Для исследований выбран подшипник (стандартного исполнения из общего производственного потока), ведущей шестерни заднего моста автомобиля с большим углом контакта (более 20°), воспринимающий значительные осевые нагрузки. Обработку торца ролика конического подшипника на ОАО «ЕПК Волжский» выполняют на сферошлифовальных автоматах модели SХК-5А методом шлифования на проход. До входа в зону контакта с

абразивным инструментом обрабатываемая поверхность заготовки конического ролика плоская, сформированная на предыдущей операции двустороннего шлифования торцов. Абразивный инструмент на операции шлифования сферы представляет собой сборный шлифовальный круг, состоящий из трех кругов различных характеристик: 14AF90ОВ, 14AF120KR, 14AF400JB4. Перед шлифованием цилиндрическую поверхность сборного инструмента правят на радиус, соответствующий радиусу сферической поверхности конического ролика подшипника. За один проход по вогнутоправленной сферической поверхности сборного абразивного инструмента происходит совмещение в одной операции черного, чистового и окончательного шлифования сферической поверхности конического ролика. В результате плоская торцовая поверхность конического ролика преобразуется в сферическую с заданными геометрическими и микрогеометрическими параметрами. Стойкость шлифовального круга по технологическому процессу 2,0 ч. После операции совмещенного шлифования измеряли шероховатость сферического торца (параметр Ra – среднее арифметическое отклонение профиля) на профилометре Form Talysurf, волнистость W и отклонение от круглости ΔEFK – на кругломере Talysond.

Вибрации подшипника исследовали на установке КВП-3 с использованием измерителя уровня вибраций ИУВ-3М. Замер выполняли пьезоэлектрическим датчиком, установленным на наружное кольцо подшипника. Определяли общий уровень вибрации (ОУВ) по виброускорению в диапазоне частот 50...10000 Гц и уровень вибраций в трех полосах частот по виброскорости в диапазоне частот: 50...300 Гц (УВ1), 300...1800 Гц (УВ2) и 1800...10000 Гц (УВ3). Уровень звукового давления (УЗД) подшипника измеряли анализатором шума и вибрации «Ассистент S» в фильтре частот «А» (общее звуковое давление) и в полосах частот в диапазоне 31,5...16 000 Гц.

Результаты измерений. Анализ результатов

Для исследований подготовлена партия из 200 роликов. По параметру шероховатости Ra из данной партии отобрано два комплекта

роликов по семнадцать штук в каждом комплекте, что соответствует количеству роликов в одном подшипнике. Комплект 1 сформирован роликами, шероховатость сферической поверхности которых находится в пределах нижней границы поля допуска: $Ra \leq 0,10$ мкм. В

комплекте 2 параметр Ra находится середине поля допуска: $0,10 < Ra \leq 0,20$ мкм. На отобранных комплектах роликов дополнительно измерены волнистость W и отклонение от круглости Δ сферы ролика (табл. 1).

1. Микрогеометрические параметры сферы роликов

1. Microgeometric parameters of the roller sphere

Ролик	Комплект 1			Комплект 2		
	Ra , мкм	W , мкм	Δ , мкм	Ra , мкм	W , мкм	Δ , мкм
1	0,06	0,51	1,57	0,12	1,00	6,37
2	0,07	0,27	0,85	0,16	1,12	10,21
3	0,07	0,22	0,67	0,11	1,17	8,08
4	0,10	0,40	2,32	0,12	0,74	5,21
5	0,07	0,36	1,31	0,17	1,10	6,89
6	0,05	0,23	1,43	0,18	1,14	6,70
7	0,06	0,18	1,31	0,14	0,66	5,38
8	0,06	0,44	1,39	0,18	1,02	12,24
9	0,05	0,28	1,80	0,16	1,00	5,74
10	0,06	0,14	2,82	0,20	0,98	4,47
11	0,06	0,23	2,41	0,11	0,83	6,77
12	0,05	0,27	1,28	0,14	1,12	7,91
13	0,07	0,35	1,53	0,19	1,51	11,59
14	0,07	0,52	2,83	0,13	1,29	3,43
15	0,05	0,25	0,77	0,15	1,02	4,41
16	0,06	0,46	1,32	0,16	0,84	6,53
17	0,07	0,51	1,14	0,12	0,73	4,30
Среднее	0,06	0,33	1,57	0,15	1,02	6,84

В каждом комплекте определены средние значения микрогеометрических параметров сферы роликов: Ram , Wm , Δm . Средние значения микрогеометрических параметров сфер роликов комплекта 2 больше средних значений микрогеометрических параметров сфер роликов комплекта 1: Ram – в 2,4 раза; Wm – в 3,1 раза; Δm – в 4,3 раза.

Ролики комплекта 2 собраны в подшипник. В соответствии с методикой измерений

определены численные значения параметров вибрации и уровня звукового давления собранного подшипника. С целью определения влияния количества роликов комплекта 1 на изменение шума (уровня звукового давления) и вибраций подшипника, ролики комплекта 2 были поочередно заменены в подшипнике на ролики комплекта 1 с такими же номерами. При каждой смене ролика комплекта 2 на ролик комплекта 1 измеряли уровень звукового

давление и вибрации подшипника. В конечном итоге все 17 роликов комплекта 2 были

заменены на ролики комплекта 1. Результаты измерений приведены в табл. 2.

2. Уровни вибраций и звукового давления, вибрационный разряд подшипников

2. Vibration and sound pressure levels, vibration discharge of bearings

n	ОУВ, дБ	Уровень вибрации по виброскорости в полосах частот, дБ			УЗД, дБ	ВРП
		УВ1 (50...300 Гц)	УВ2 (300...1800 Гц)	УВ3 (1800...10000 Гц)		
0*	103	76	81	88	78	Ш1
1**	103	76	81	88	78	Ш1
2**	102	76	81	87	77	Ш1
3**	102	76	81	87	77	Ш1
4**	102	76	81	87	77	Ш1
5**	102	76	80	87	76	Ш1
6**	102	76	80	86	76	Ш2
7**	101	76	80	86	75	Ш2
8**	100	76	80	85	75	Ш2
9**	100	75	80	85	75	Ш2
10**	100	75	80	84	75	Ш2
11**	99	75	80	84	75	Ш2
12**	99	75	80	83	74	Ш3
13**	98	75	80	83	74	Ш3
14**	97	75	80	82	74	Ш3
15**	97	75	80	82	74	Ш3
16**	97	75	80	81	74	Ш3
17***	96	74	80	78	73	Ш3

Примечания: * – подшипник с роликами комплекта 2;
** – количество роликов в подшипнике комплекта 2, заменённые на ролики комплекта 1;
*** – подшипник, в котором все ролики комплекта 2 заменены на ролики комплекта 1.

Из табл. 3, следует, что увеличение количества роликов из первого комплекта снижает уровень вибрации подшипника по третьей полосе частот и соответственно повышает вибрационный разряд подшипника (ВРП) до Ш3 (вибрационный разряд подшипника определяли в соответствии с РД ВНИПП.038-08).

На основании данных табл. 1 определены средние значения микрогеометрических параметров сфер роликов в подшипнике при каждой замене роликов комплекта 2 на ролики комплекта 1. Среднее значение параметров шероховатости Ram , волнистости Wm , отклонения от круглости Δm и доверительные

интервалы на данные параметры с учетом погрешности измерений приведены в табл. 3.

Взаимосвязь между количеством роликов n комплекта 1, заменивших ролики комплекта 2, средними значениями микрогеометрических

и геометрических параметров сфер роликов в подшипнике, параметрами шума и вибрации подшипника оценивали коэффициентом корреляции (табл. 4).

3. Средние значения микрогеометрических параметров сфер роликов в подшипниках

3. Average values of microgeometric parameters of roller spheres in bearings

n	Ram , мкм	$\pm\Delta Ram$, мкм	Wm , мкм	$\pm\Delta Wm$, мкм	Δm , мкм	$\pm\Delta m$, мкм
0*	0,15	0,02	1,02	0,10	6,84	1,16
1**	0,15	0,02	1,00	0,11	6,65	1,30
2**	0,14	0,02	0,98	0,12	6,34	1,43
3**	0,13	0,02	0,94	0,15	6,13	1,55
4**	0,13	0,02	0,89	0,15	6,10	1,56
5**	0,12	0,02	0,82	0,14	5,50	1,50
6**	0,12	0,02	0,77	0,15	5,11	1,54
7**	0,12	0,02	0,74	0,16	4,86	1,55
8**	0,11	0,02	0,69	0,17	4,76	1,57
9**	0,1	0,02	0,64	0,17	4,53	1,60
10**	0,09	0,02	0,61	0,17	3,89	1,34
11**	0,09	0,02	0,58	0,17	3,65	1,36
12**	0,08	0,02	0,53	0,17	3,34	1,33
13**	0,08	0,01	0,49	0,15	3,01	1,28
14**	0,07	0,01	0,47	0,15	2,84	1,25
15**	0,07	0,01	0,41	0,12	2,41	1,11
16**	0,07	0,01	0,36	0,09	1,86	0,62
17***	0,06	0,01	0,33	0,06	1,57	0,30

Примечания: * – подшипник с роликами комплекта 2;

** – количество роликов в подшипнике комплекта 2, имеющих соответствующие номера от 1 до 17, заменённые на ролики комплекта 1 с такими же номерами;

*** – подшипник, в котором все ролики комплекта 2 заменены на ролики комплекта 1.

4. Коэффициенты корреляции

4. Correlation coefficients

Ram	Wm	Δm	ОУВ	УВ1	УВ2	УВ3	УЗД
1,00	1,00	1,00	0,98	0,88	0,78	0,96	0,96

В соответствии с классификацией Чеддока сила связи между количеством n замененных роликов комплекта 2 на ролики комплекта 1 и средними значениями микрогеометрических параметров сферы ролика весьма высока, коэффициент корреляции положительный ($r = 1,00$). Взаимосвязь n с параметрами ОУВ, УВ2 и УЗД так же весьма высока. Коэффициенты корреляции между данными параметрами приближаются к единице. Взаимосвязь между n и уровнем вибрации по виброскорости в первой (УВ1) и второй (УВ2) полосам частот относится к категории «высокая». Коэффициент корреляции, определяющий взаимосвязь между параметрами уровней вибрации и звукового давления положительный, что свидетельствует о прямой связи между ними.

Графические зависимости изменения средних микрогеометрических параметров сфер роликов в подшипнике Ram , Wm и Δm от количества замененных роликов n показаны на рис. 1. Графики аппроксимированы линейными зависимостями:

$$Y = an + b, \quad (1)$$

где Y – среднее значение микрогеометрического параметра; a и b – постоянные коэффициенты. Значения коэффициентов a , b и достоверности аппроксимации R^2 приведены в табл. 5. Коэффициент $R^2 = 0,99$ свидетельствует о правомерности описания взаимосвязи микрогеометрических параметров Ram , Wm , Δm от n линейной зависимостью (1).

Аналогичные зависимости между показателями вибраций и шума от количества замененных роликов n приведены на рис. 1, б. Наибольшее значение коэффициента достоверности аппроксимации получены для параметров ОУВ, УЗД и УВ3 (см. табл. 5). Снижение R^2 наблюдается при аппроксимации линейной зависимостью от n уровня вибрации по виброскорости во второй и третьей полосах частот (УВ1, УВ2). Статистический анализ дисперсий данных параметров показал отсутствие значимого различия между средними значениями данных параметров в интервале n от 1,0 до 17. В отношении УВ1, УВ2 можно говорить лишь о тенденции снижения данных параметров с увеличением n .

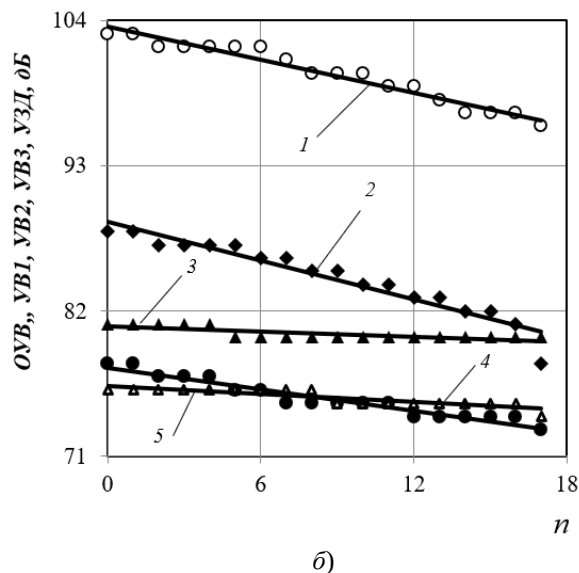
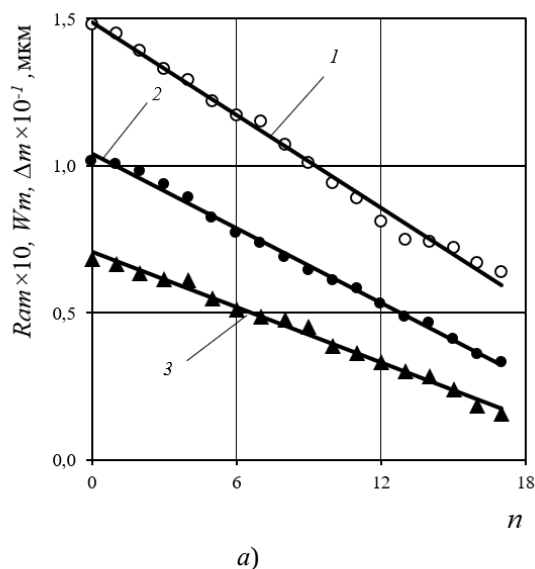


Рис. 1. Зависимости от количества роликов n :

a – для средних значений микрогеометрических параметров:
1 – Ram ; 2 – Wm ; 3 – Δm ;

b – для параметров вибрации и шума подшипников:
1 – ОУВ; 2 – УВ3; 3 – УВ2; 4 – УЗД; 5 – УВ1

Fig. 1. Dependences on the number of rollers n :

a – for average values of microgeometric parameters:
1 – Ram ; 2 – Wm ; 3 – Δm ;

b – for vibration and noise parameters of bearings:
1 – ОУВ; 2 – УВ3; 3 – УВ2; 4 – УЗД; 5 – УВ1

5. Коэффициенты a , b и достоверности аппроксимации R^2 линейных уравнений (1)

5. Coefficients a , b and reliability of the R^2 approximation linear equations (1)

Параметры	Коэффициенты		
	a	b	R^2
Ram	0,053	0,059	0,99
Wm	0,042	0,321	0,99
Δm	0,312	1,761	0,99
ОУВ	0,417	96,50	0,96
УВ1	0,277	72,70	0,93
УВ2	0,101	74,60	0,71
УВ3	0,067	79,70	0,60
УЗД	0,490	80,40	0,92

Из сравнения результатов аппроксимации геометрических параметров роликов, уровней вибраций и шума подшипников от количества роликов n (см. рис. 1) следует, что анализируемые параметры должны быть взаимосвязанными. С увеличением n снижаются средние значения параметров шероховатости Ram , волнистости Wm , отклонения от круглости Δm сферы ролика, параметры шума и вибрации. Силу корреляционной связи между микрогеометрическими параметрами, параметрами звукового давления и вибраций также оценили по коэффициенту парной корреляции. В связи с отсутствием значимого различия между параметрами уровня вибрации по виброскорости во второй и третьей полосах частот (УВ2, УВ3), влияние микрогеометрических параметров на данные параметры не рассматривали (см. табл. 5).

Максимальные значения R^2 получены между теми параметрами, которые имели высокий коэффициент парной корреляции с

количеством замещенных роликов (см. табл. 6).

Наибольшее влияние на показатели уровня вибраций и звукового давления подшипников оказывают среднее значение шероховатости Ram , волнистости Wm и отклонение от круглости Δm сферы ролика. Коэффициенты парной корреляции между данными параметрами и показателями вибрации и шума (общий уровень вибрации по виброускорению ОУВ, скорректированный по фильтру А, уровень звукового давления УЗД и уровень вибрации по виброскорости УВ3 в третьей полосе частот) находятся в интервале 0,95...0,98, что свидетельствует о высокой силе корреляционной связи между ними. Взаимосвязь между параметрами прямая, т. е. с уменьшением показателей микрогеометрических параметров (Ram ; Wm ; Δm) показатели уровня вибраций и шума подшипников снижаются.

6. Коэффициенты парной корреляции R^2 между показателями уровня вибраций и шума подшипников и микрогеометрическими параметрами сферы роликов

6. Coefficients of the pair correlation R^2 of bearing vibration and noise level indicators and microgeometric parameters of the roller sphere

Факторы	ОУВ	УВ1	УЗД
Ram	0,97	0,97	0,95
Wm	0,97	0,96	0,95
Δm	0,98	0,95	0,97

Графические зависимости между анализируемыми параметрами приведены на рис. 2. Функциональные связи по аналогии с формулой (1) представлены линейными зависимостями:

$$Y_2 = a_2 x_2 + b_2, \quad (2)$$

где Y_2 – показатели уровня вибраций и шума подшипников (ОУВ, УВ3, УЗД), x_2 – средние значения соответствующих показателей

микрогеометрических параметров, a_2 и b_2 – постоянные коэффициенты. Значения коэффициентов a_2 , b_2 и достоверности аппроксимации R^2 приведены в табл. 7.

Из этого следует, что основными факторами, влияющими на шум и вибрацию подшипника, являются микрогеометрические параметры.

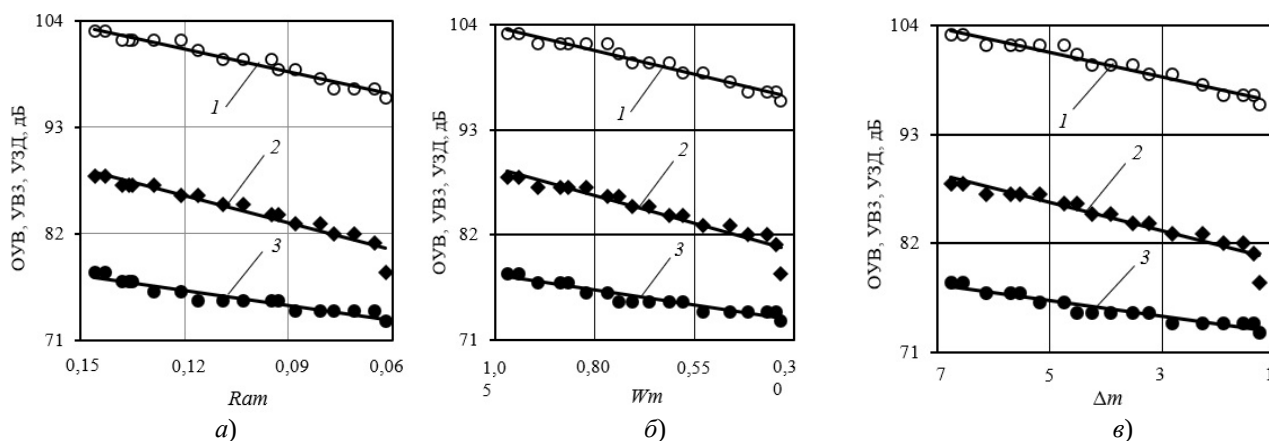


Рис. 2. Зависимости параметров уровней вибраций и шума подшипников от параметров качества обработанной поверхности сферы ролика:

а – зависимость ОУВ, УВ3, УЗД от Ram ; б – зависимость ОУВ, УВ3, УЗД от Wm ; в – зависимость ОУВ, УВ3, УЗД от Δm ; 1 – ОУВ; 2 – УВ3; 3 – УЗД

Fig. 2. Dependences of vibration and noise levels parameters of bearings on the quality parameters of roller sphere treated surface:

а – dependence of OUV, UV3, UZD on Ram ; б – dependence of OUV, UV3, UZD on Wm ; в – dependence of OUV, UV3, UZD on Δm ;

1 – OUV; 2 – UV3; 3 – UZD

7. Коэффициенты a_2 , b_2 и достоверности аппроксимации R^2

7. Coefficients a_2 , b_2 and reliability of approximation R^2

Параметры	Ram			Wm			Δm		
	a_2	b_2	R^2	a_2	b_2	R^2	a_2	b_2	R^2
ОУВ	78,4	91,8	0,94	9,76	93,4	0,94	1,33	94,1	0,95
УВ3	91,6	75,1	0,90	11,50	76,8	0,91	1,58	77,6	0,94
УЗД	52,5	69,9	0,94	6,54	70,9	0,93	0,87	71,5	0,91

В соответствии с принятой методикой первоначальное формирование групп роликов конических подшипников осуществлялось по параметру шероховатости обработанной поверхности – среднему арифметическому отклонению профиля Ra . Остальные микрогеометрические параметры – волнистость и максимальное отклонение от круглости, специально не выбирали. В данном случае они являлись как бы второстепенными факторами, привязанными к конкретному значению параметра Ra . Но в результате принятой методики

усреднения микрогеометрических параметров в каждом из семнадцати рассмотренных подшипников, содержащих семнадцать различных комплектов роликов, информативность усредненных значений Wm и Δm , относящихся к подшипнику в целом, по сравнению с индивидуальными параметрами конкретного конического ролика Wi и Δi , возросла. В связи с этим, представляет интерес рассмотреть связь данных средних микрогеометрических параметров со средним параметром Ram (см. рис. 3). Графические данные аппроксимированы

двумя функциональными зависимостями: линейной и логарифмической. В первом случае коэффициент достоверности Wm (Ram) $R^2 = 0,91$, во втором – $0,99$. В связи с более высоким значением R^2 взаимосвязь параметров аппроксимировали логарифмической зависимостью:

$$Wm = 5,92 \ln(Ram) + 18,04,$$

где $R^2 = 0,99$.

При моделировании взаимосвязи параметров $\Delta m(Ram)$ также использовали логарифмическую зависимость:

$$\Delta m = 0,80 \ln(Ram) + 2,52,$$

где $R^2 = 0,98$.

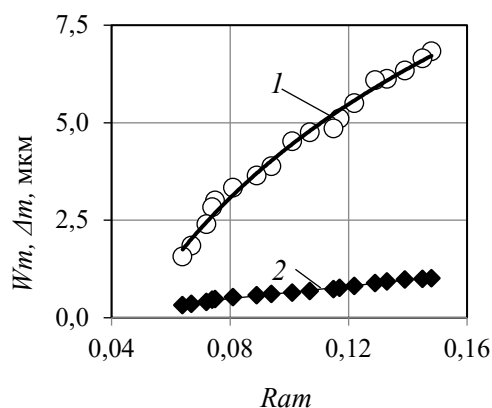


Рис. 3. Зависимости от среднего значения Ram средних значений параметров:
1 – Wm ; 2 – Δm

Fig. 3. Dependencies on the average value Ram average parameter values:
1 – Wm ; 2 – Δm

Выводы

При обеспечении параметров шероховатость Ra сферической поверхности роликов стандартного исполнения из общего производственного потока в соответствии с требованиями конструкторской документации в пределах до 25 % поля допуска возможно повышение вибрационного разряда подшипника с Ш1 до Ш2 и Ш3. Подшипники с вибрационным разрядом Ш3 обладают лучшими характеристиками по шуму (звуковому давлению) и вибрации и составляют конкуренцию аналогам подшипников иностранного производства, применяемым в узлах легковых и грузовых автомобилей, прицепной техники.

Микрогеометрические параметры сферы роликов подшипника оказывают значимое

влияние на следующие показатели уровня вибраций и шума подшипников: общий уровень вибрации по виброускорению ОУВ, уровень вибрации по виброскорости УВЗ в третьей полосе частот и уровень звукового давления УЗД.

Установлена линейная зависимость между параметрами вибрации и шума подшипников и средними арифметическими значениями микрогеометрических параметров сферической поверхности роликов в подшипниках. При снижении средних значений параметров шероховатости сферы роликов в подшипнике Ra в 2,5 раза, волнистости – в 3,1 раза, максимального отклонения от круглости сферы роликов – в 4,4 раза общий уровень вибрации и уровень звукового давления снижаются на 7,0 %, уровень вибрации в третьей полосе частот УВЗ – на 13 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Никитин А.А., Погораздов В.В., Дробязко С.В., Лукьяненко В.В., Шпак П.Ф. Вибрация как показатель технического состояния подшипника качения и технологического уровня его восстановления // Тяжелое машиностроение. 2010. №10. С. 35–37. EDN NAVEND.
2. Чечуевский В.П., Шкалик Э.А. Экспериментальные исследования оценки технического состояния неразборных подшипников качения авиационных двигателей по уровню их вибрации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2011. №1. С. 76–82. EDN QYVRZL
3. Ляхов В.В., Кобыляцкий Ю.В. Шум и вибрация в подшипниковых узлах электродвигателей. Виды и способы их устранения // Вестник современных технологий. 2016. № 2 (2). С. 50–55. EDN YFMTLN.
4. Баляба М.В., Крючков А.Н., Ермилов М.А., Плотников С.М., Ермилова Е.Н., Видяскина А.Н. Анализ вибрационного состояния подшипников качения при дефекте «износ внутренней обоймы подшипника» // Динамика и виброакустика. 2021. Т. 7. № 1. С. 6–14. EDN JIGYBG.
5. Орлов А.В. Вибрация в радиальном роликовом подшипнике, вызываемая износом // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 63–69. EDN QYWVGF.
6. Vishwagna Ramya, J. Chandra Sekhar FEA Study on Vibration Analysis of Tapper Roller Bearing. International journal and magazine of engineering, technology, management and research. 2015. V. 2. P. 1474–1493.
7. T. Xu, Y. Liu, A. Pei, and L. Jiang. The Roller Bearing Fault Diagnosis Methods with Harmonic Wavelet Ppacket and Multi-classification Relevance Vector Machine/ Journal of Vibroengineering, 2015. Vol. 17, No. 6. P. 2962–2976.
8. F. Gu, X. Tian, Z. Chen, T. Wang, I. Rehab A. Ball. Fault Severity Diagnosis of Rolling Element Bearings Based on Kurtogram and Envelope Analysis. International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering, 04-05 January 2014, p. 25–29. ID: 1123057.
9. Tandon N., Choudnury A. A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings. Tribology International. 1999. №32. P. 469–480.

10. Kiral Z., Karagulle H. Vibration Analysis of Rolling Element Bearings with Various Defects Under the Action of an Unbalanced Force. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006. №20. P. 1967–1991. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.05.001.

11. Щербя М.Ю., Кохановский В.А. Статистические исследования отклонений профилей дорожек качения подшипников цилиндрических станков // Вестник ДГТУ. № 1(62). Вып. 1. 2012. С. 74–78. EDN PBKETZ.

12. Jing Liu. Investigation for Vibrations of Tapered Roller Bearing Considering the Surface Waviness on the Rib of the Inner Race / Journal of Mechanical Engineering. 2018. 54(8):26. DOI: 10.3901/JME.2018.08.026/

13. Xintao Xia. Information Poor Relation of Inner Ring Rib Roughness with Tapered Rroller Bearing Vbration / 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 2011. Inner Mongolia, China. DOI: 10.1109/MACE.2011.5988139

14. Носенко В.А., Зуев А.В., Голованов А.Н. Влияние шероховатости сферической поверхности ролика на шумовые характеристики конического подшипника // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 1 (224). С. 29–32. EDN VTRZRK.

15. P. Li, Y. Zhang, D. Huang. Study on Three Axis Vibration Measurement Technology of Roller Bearing. Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 10. P. 144–148.

REFERENCES

1. Nikitin A.A., Pogorazdov V.V., Drobyazko S.V., Lukyanenko V.V., Shpak P.F. Vibration as an indicator of the technical condition of a rolling bearing and the technological level of its restoration // Heavy engineering, 2010, No.10, pp. 35–37. EDN NAVAND.

2. Chechuyevsky V.P., Shkalikov E.A. Experimental studies of health assessment for non-separable roller bearings of aircraft engines by their vibration level // Scientific Bulletin of SRDE SA, 2011, No.1, pp. 76–82. EDN QYVRZL

3. Lyakhov V.V., Kobylatsky Yu.V. Noise and vibration in bearing units of electric motors. Types and methods of their elimination // Bulletin of modern technologies, 2016, No. 2 (2), pp. 50–55. EDN YFMTLN.

4. Balyaba M.V., Kryuchkov A.N., Ermilov M.A., Plotnikov S.M., Ermilova E.N., Vidyaskina A.N. Analysis of the vibration state of roller bearings with a defect of inner bearing cage wear // Dynamics and vibroacoustics. 2021, vol. 7, No. 1, pp. 6–14. EDN JIGYBG.

5. Orlov A.V. Vibration in a radial roller bearing caused by wear // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2013, No. 4, pp. 63–69. EDN QYWVGF.

6. Vishwagna Ramya, J. Chandra Sekhar FEA Study on Vibration Analysis of Tapper Roller Bearing. International journal and magazine of engineering, technology, management and research. 2015. V. 2. P. 1474–1493.

7. T. Xu, Y. Liu, A. Pei, and L. Jiang. The Roller Bearing Fault Diagnosis Methods with Harmonic Wavelet Ppacket and Multi-classification Relevance Vector Machine/ Journal of Vibroengineering, 2015. Vol. 17, No. 6. P. 2962–2976.

8. F. Gu, X. Tian, Z. Chen, T. Wang, I. Rehab A. Ball. Fault Severity Diagnosis of Rolling Element Bearings Based on Kurtogram and Envelope Analysis. International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering, 04–05 January 2014, p. 25–29. ID: 1123057.

9. Tandon N., Choudnury A. A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings. Tribology International. 1999. №32. P. 469–480.

10. Kiral Z., Karagulle H. Vibration Analysis of Rolling Element Bearings with Various Defects Under the Action of an Unbalanced Force. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006. №20. P. 1967–1991. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.05.001

11. Shcherba M.Yu., Kokhanovsky V.A. Statistical studies of roller path profile deviations for bearings of cylindrical grinding machines // Bulletin of DSTU, No. 1(62), issue 1. 2012, pp. 74–78. EDN PBKETZ.

12. Jing Liu. Investigation for Vibrations of Tapered Roller Bearing Considering the Surface Waviness on the Rib of the Inner Race / Journal of Mechanical Engineering. 2018. 54(8):26. DOI: 10.3901/JME.2018.08.026

13. Xintao Xia. Information Poor Relation of Inner Ring Rib Roughness with Tapered Rroller Bearing Vbration / 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 2011. Inner Mongolia, China. DOI: 10.1109/MACE.2011.5988139

14. Nosenko V.A., Zuev A.V., Golovanov A.N. Influence of the roughness of the spherical roller surface on the noise characteristics of a conical bearing // Proceedings of the Volga-Grad State Technical University. 2019, No. 1 (224), pp. 29–32. EDN VTRZRK

15. P. Li, Y. Zhang, D. Huang. Study on Three Axis Vibration Measurement Technology of Roller Bearing. Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 10. P. 144–148.

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

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

Статья поступила в редакцию 05.11.2023; одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 02.12.2023

The article was submitted 05.11.2023; approved after reviewing 20.11.2023; assepted for publication 02.12.2023

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 41-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 41-48.

Научная статья

УДК 621.891

doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Фрактальная размерность дискретного контакта

Виктор Петрович Тихомиров¹, Д.Т.Н.

Михаил Геннадьевич Шалыгин², Д.Т.Н.

Михаил Александрович Измеров³, К.Т.Н.

Алексей Валентинович Крутов⁴, К.Т.Н.

^{1, 2, 3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

⁴ Московский государственный технический университет, Москва, Россия

¹ dm-bgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7269-8175>

² migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

³ m.izmerov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4170-6184>

⁴ krutovlesha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Произведена оценка параметров контактного взаимодействия инженерных поверхностей и их фрактальных моделей. Фрактальные модели очень хорошо описывают геометрическую структуру шероховатости, адекватны исходным инженерным поверхностям и имеют случайную составляющую при моделировании, которая позволяет каждый раз генерировать новую поверхность с исходными геометрическими параметрами, что даёт возможность проводить исследование контактного взаимодействия поверхностей необходимое количество раз. При решении контактных задач шероховатых поверхностей обычно для упрощения расчётов используют замену исходного контакта на взаимодействие гладкой поверхности с поверхностью, имеющую эквивалентную шероховатость, которую требуется определить. В работе изложены принципы нахождения фрактальной размерности инженерных поверхностей, а также эквивалентной поверхности при её контакте с гладкой, сопряжение которых эквивалентно контакту исходных поверхностей. При этом в настоящей работе показано, что для анизотропных исходных поверхностей имеем совершенно разные параметры контактного взаимодействия при разном направлении их сочетания, что необходимо учитывать при анализе и моделировании. Оценка фрактальной размерности эквивалентной поверхности производилась с помощью известного метода «периметр-площадь», который при определении параметров контактирования, включая фрактальную размерность, позволяет учесть направление следов обработки. Таким образом, в настоящей работе представлена методика определения фрактальной размерности как поверхности, так и фрактального объекта – карты пятен контакта, а также установлен диапазон изменения отношения фактической площади контакта к площади максимального пятна и предложена процедура оценки фрактальной размерности, необходимой для определения параметров контактного взаимодействия шероховатых поверхностей.

Ключевые слова: фрактальная размерность, инженерная поверхность, эквивалентная поверхность

Для цитирования: Тихомиров В.П., Шалыгин М.Г., Измеров М.А., Крутов А.В. Фрактальная размерность дискретного контакта // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Fractal dimension of a discrete contact

Viktor P. Tikhomirov¹, D. Eng.

Mikhail G. Shalygin², D. Eng.

Mikhail A. Izmerov³, Ph.D. Eng.

Alexei V. Krutov Ph.D. Eng.

^{1, 2, 3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

⁴ Moscow State Technical University

¹ dm-bgtu@yandex.ru

² migshalygin@yandex.ru

³ m.izmerov@yandex.ru

⁴ krutovlesha@yandex.ru

Abstract. Contact interaction ability rating for engineering surfaces and their fractal models is carried out. Fractal models describe roughness component geometry properly, they are adequate to the initial engineering surfaces and possess a random component when modeled, which makes it possible to generate a new surface with the desired geometric parameters at all times, allowing the study of the contact interaction of surfaces to be carried as many times as necessary. When solving contact problems of rough surfaces for simplification of calculations, the replacement of the initial contact with the interaction of a smooth surface with a surface having an equivalent roughness, necessary to be determined, is usually used. The paper outlines the principles of finding the

fractal dimension of engineering surfaces, as well as an equivalent surface in contact with a smooth one, when the conjugation of both is equivalent to the contact of the initial surfaces. At the same time, it is shown in this work that for anisotropic initial surfaces there are completely different parameters of contact interaction in different directions of their combination, which must be taken into account in the analysis and modelling. The fractal dimension of the equivalent surface was done using the well-known "perimeter-area" method, which, when determining the contact parameters, including the fractal dimension, allows taking into account the direction of the processing traces. Thus, this paper presents a method for determining the fractal dimension of both the surface and the fractal object, and also a contact spots map, an area ratio turndown for the actual contact area to the area of the maximum spot is shown as well, a procedure for estimating the fractal dimension necessary to determine the parameters of the contact interactions of rough surfaces, is proposed.

Keywords: fractal dimension, engineering surface, equivalent surface

For citation: Tikhomirov V.P., Shalygin M.G., Izmerov M.A., Krutov A.V. Fractal dimension of a discrete contact / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 1 (151). P. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Известны способы определения фрактальной размерности профиля инженерной поверхности и самой поверхности [1]. Кроме того, рассмотрен подход к оценке фрактальной размерности соединения, которая зависит от фрактальных размерностей сопряженных поверхностей. Разработанный алгоритм и соответствующая программа позволяют оценить фрактальную размерность поверхности с помощью показателя Херста и метода «периметр-площадь» (рис. 1).

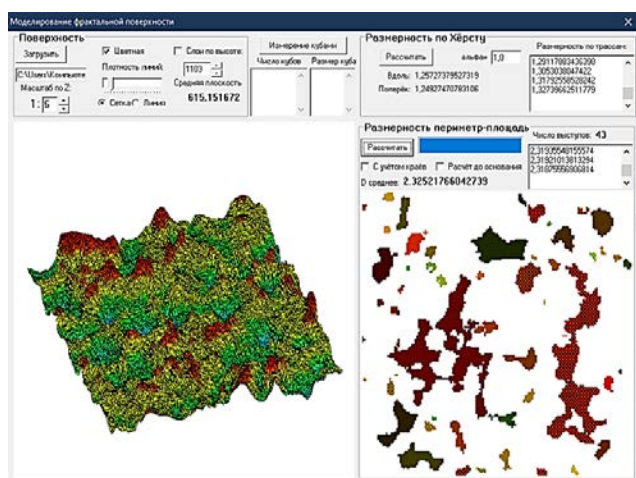


Рис. 1. К оценке фрактальной размерности

Fig. 1. For the assessment of the fractal dimension

Размерность по Херсту дает значение, равное 1,257 (для поверхности 2,257) вдоль одного направления и в перпендикулярном направлении – 1,249 (2,259). Практически можно считать данную поверхность изотропной. Оценка по методу «периметр–площадь» дает близкий результат и составляет 2,325.

На рис. 2 показаны выделенные пятна контакта, среди которых отмечено пятно, имеющее максимальную площадь a_L .



Рис. 2. Пятна контакта

Fig. 2. Contact spots

Площади пятен контакта являются площадями среза выступов на каком-то определенном уровне. На самом деле при определении площади пятна контакта следует учитывать состояние контакта: упругое, упругопластическое или пластическое. Так, при упругом контакте площадь физического контакта оказывается в два раза меньше, чем при пластическом. При оценке фрактальной размерности это обстоятельство не принимается во внимание, однако при оценке параметров контактного взаимодействия состояние контакта учитывается в уравнении размерного распределения площадей пятен контакта.

Параметры эквивалентной шероховатой поверхности

Расчет параметров контактного взаимодействия шероховатых поверхностей обычно производится путем адекватной замены на взаимодействие гладкой поверхности с эквивалентной шероховатой. Взаимодействие шероховатых поверхностей при малых нагрузках сопровождается формированием отдельных пятен, размеры и

форма которых зависят от параметров шероховатости сопряженных тел и направлением следов обработки (рис. 3 и рис. 4).

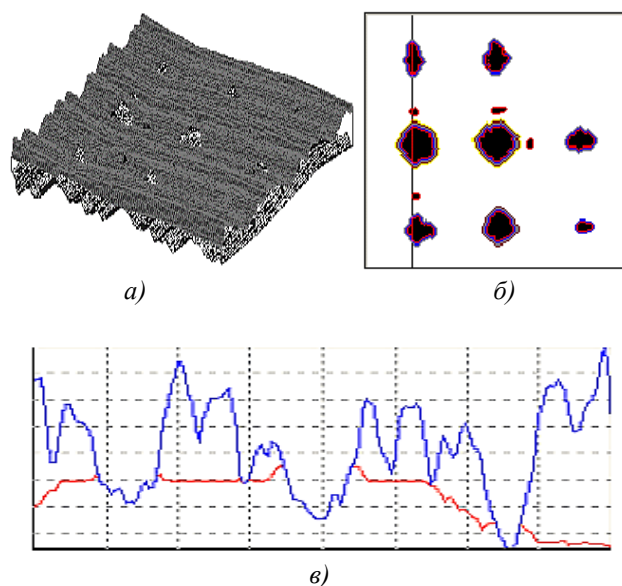


Рис. 3. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей с взаимно перпендикулярными следами обработки (а), пятна касания (б), зазор по линии (в), указанной на карте пятен касания (б)

Fig. 3. Contact interaction of rough surfaces with mutually perpendicular processing traces (a), contact points (b), gap along the line (c) indicated on the map of contact points (b)

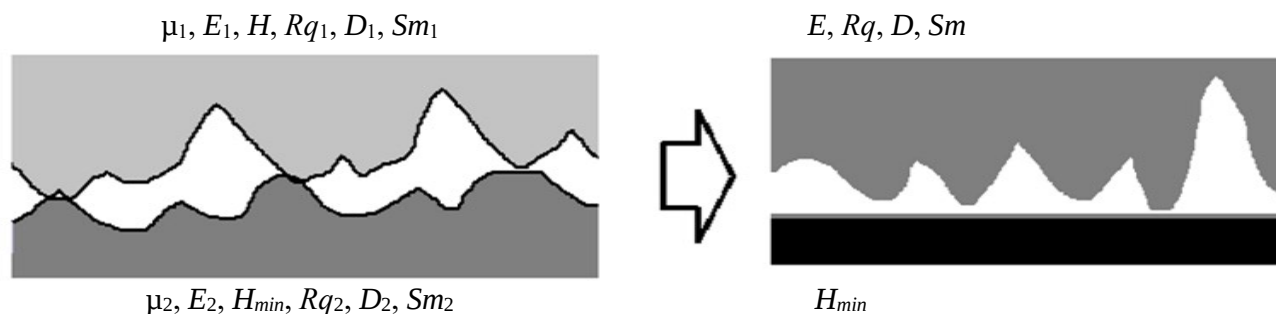


Рис. 5. Схема приведения к эквивалентной поверхности

Fig. 5. Scheme of resulting in an equivalent surface

Используем понятие первичная поверхность (primary surface), т. е. поверхность, не подверженная фильтрации и не зафиксированная в виде профилограммы (2D образ) или в 3D представлении. Математически первичная по-

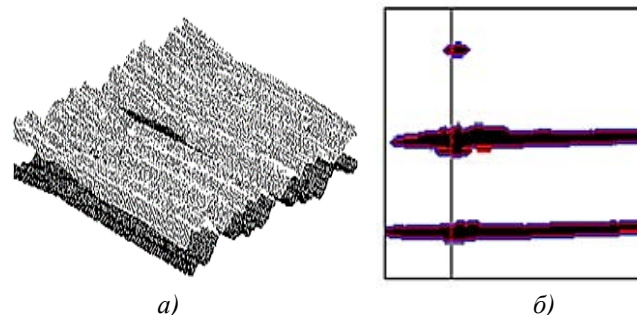


Рис. 4. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей с совпадающими следами обработки (а), пятна касания (б)

Fig. 4. Contact interaction of rough surfaces having matching traces of processing (a), contact points (b)

Схема приведения к эквивалентной шероховатой поверхности представлена на рис. 5. Используем понятие первичная поверхность (primary surface), т. е. поверхность, не подверженная фильтрации и не зафиксированная в виде профилограммы (2D образ) или в 3D представлении. Математически первичная поверхность описывается уравнением Вейерштрасса-Мандельброта.

верхность описывается уравнением Вейерштрасса-Мандельброта.

В работе [2] приведена зависимость ординат поверхности относительно срединной плоскости в виде:

$$z(x, y) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{D_S-2} \left(\frac{\ln \gamma}{M} \right)^{1/2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=n_1}^{n_{\max}} \gamma^{(D_S-3)n} \left[\cos \phi_{1n} - \cos \left[\frac{2\pi \gamma^n (x^2 + y^2)^{1/2}}{L} \cos \left[\arctg \left(\frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{M} \right] + \phi_{1n} \right] \right],$$

где $z(x, y)$ – ординаты поверхности; D_s – фрактальная размерность поверхности ($2,0 < D_s < 3,0$; $D_s = D + 1,0$); γ – параметр масштаба, определяющий спектральную плотность и самоаффинность ($\gamma > 1,0$); L – длина, характеризующая наличие фрактальности; Φ_{1n} – случайная фаза равномерно распределена на отрезке $[0, 2\pi]$; M – количество вершин выступов на рассматриваемом участке поверхности; $n_{\max} = \text{int}[\lg(L/L_s)/\lg\gamma]$ – целое число верхнего предела суммы; L_s – длина, соответствующая размеру щупа; $\gamma^{n_1} = \frac{1}{L}$.

Случайная фаза используется для того, чтобы исключить совпадения частот в каждой точке профиля. Фрактальный параметр G является высотным масштабным показателем, не зависящим от частоты. некоторые фрактальные поверхности показаны на рис. 6.

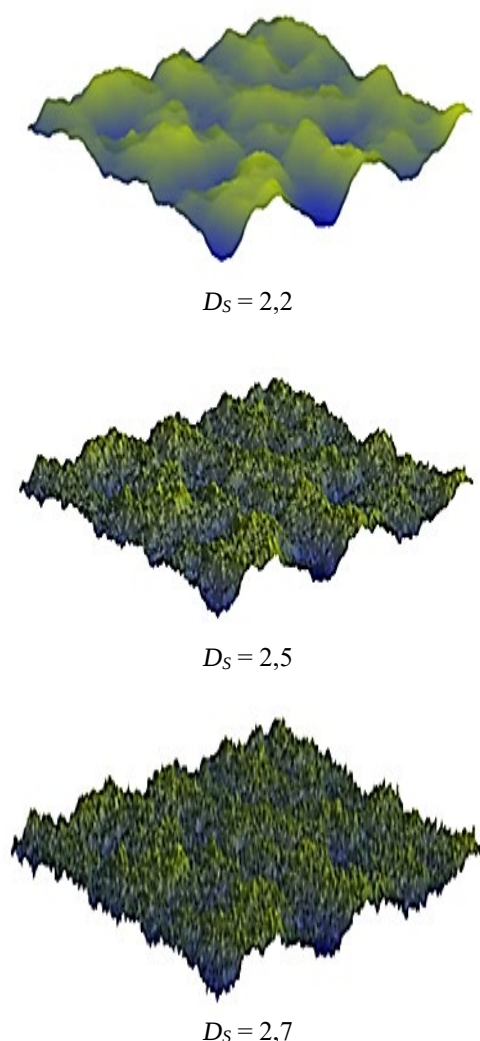


Рис. 6. Поверхности с разной размерностью

Fig. 6. Surfaces with different dimensions

Сопряжения двух фрактальных поверхностей, имеющих разные размерности, можно привести к сопряжению гладкой поверхности с поверхностью, имеющую эквивалентную шероховатость. Предлагается процедура такой замены, которая заключается в следующем. Площади сформированных пятен контакта подвергаются анализу. При этом фрактальная размерность определяется с помощью метода «периметр-площадь».

Для анализа соотношения периметр-площадь выделим характерный «остров» – пятно контакта (рис. 7).

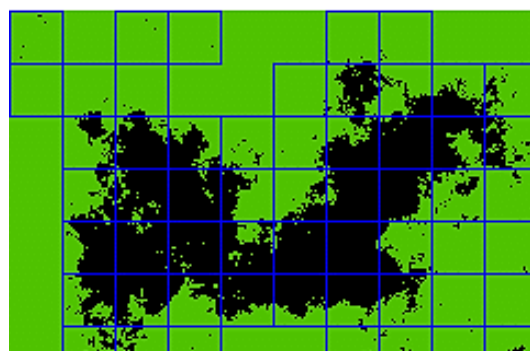


Рис. 7. Пятно контакта

Fig. 7. Contact spot

Процедура определения фрактальной размерности клеточным методом представлена на рис. 8.

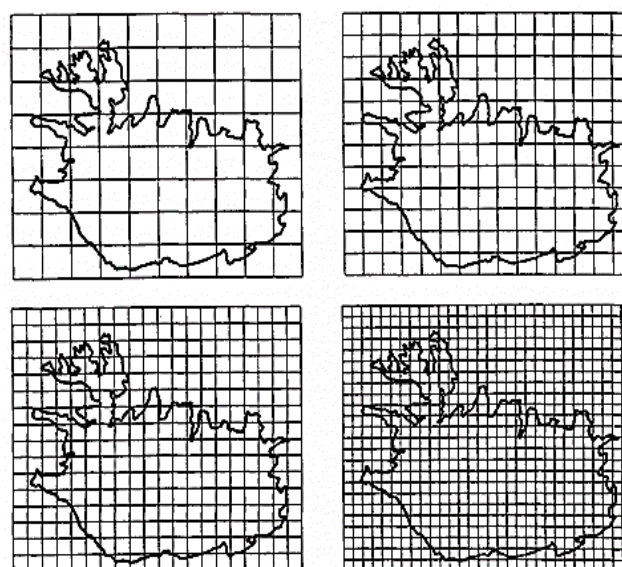


Рис. 8. Покрывание фрактального объекта сеткой с квадратными ячейками (Paul S. Addison)

Fig. 8. Covering a fractal object with a grid with square cells (Paul S. Addison)

Запишем соотношение «периметр-площадь» в виде:

$$R(\delta) = \frac{P^{1/D}}{\sqrt{A}}, \quad (1)$$

где P – периметр; A – площадь; $R(\delta)$ – параметр, зависящий от масштаба измерения (размера квадратной ячейки); D – фрактальная размерность ($1,0 < D < 2,0$).

Учитывая, что периметр определяется выражением:

$$P(\delta) = c\delta^{1-D}[A(\delta)]^{D/2},$$

запишем соотношение (1) следующим образом:

$$R(\delta) = \frac{P^{1/D}}{\sqrt{A}} = c^{1/D}\delta^{(1-D)/D}, \quad (2)$$

где c – коэффициент.

Изменение периметра при разной длине квадратной ячейки следует зависимости:

$$\left(\frac{P(\delta_1)}{P(\delta_2)}\right)^{1/D} = \left[\frac{A(\delta_1)}{A(\delta_2)}\right]^{1/2} \left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^{(1-D)/D}.$$

Соотношение (2) выражает условие самоподобия «островов» как фрактальных объектов. При этом размер δ должен быть достаточно малым, чтобы можно было проводить анализ малых пятен.

Прологарифмировав уравнение (2), получим:

$$\frac{1}{D} \lg P(\delta_1) - \frac{1}{2} \lg A = \lg \left(c^{1/D} \delta^{\frac{(1-D)}{D}} \right).$$

Преобразовав полученное выражение, запишем:

$$\lg A(\delta) = -2 \lg \left(c^{1/D} \delta^{\frac{(1-D)}{D}} \right) + \frac{2}{D} \lg P(\delta). \quad (3)$$

Зависимость «периметр-площадь» в двойных логарифмических координатах пред-

ставляет собой прямую линию, угловой коэффициент которой равен $1/D$.

Анализ выражения (3) показывает, что величиной $-2 \lg \left(c^{1/D} \delta^{\frac{(1-D)}{D}} \right)$ можно пренебречь, приняв $c = 1,0$ и $\delta = 1,0$, тогда:

$$D = \frac{2 \lg P(\delta)}{\lg A(\delta)}.$$

После покрытия пятна сеткой с квадратными ячейками производят подсчет числа ячеек, покрывающих площадь и относящихся к периметру

$$A(\delta) = N_A \delta^2; \quad P(\delta) = N_P \delta.$$

После определения фрактальной размерности для нескольких пятен находят арифметическое среднее значение, которое соответствует размерности эквивалентной шероховатой поверхности D_{eq} .

Таким образом, фрактальная размерность эквивалентной шероховатой поверхности определяется как:

$$D_{Seq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i + 1); \quad D_{eq} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i.$$

Здесь фрактальная размерность поверхности по Б. Мандельброту $D_S = D + 1,0$; $2,0 < D_S < 3,0$.

Найденная фрактальная размерность дает основание считать, что несущая способность двух шероховатых поверхностей соответствует несущей способности гладкой поверхности с эквивалентной шероховатой.

Параметр фрактальной шероховатости

Параметр фрактальной шероховатости G эквивалентной шероховатой поверхности определяется из соотношения:

$$R_{qeq}^2 = (R_{q1}^2 + R_{q2}^2) = \frac{G^{2(D_{eq}-1)} L_m^{2(2-D_{eq})}}{\sin \left[\pi \left(\frac{2D_{eq}-3}{2} \right) \right] \Gamma(2D_{eq}-3)},$$

где R_q – среднее квадратичное отклонение ординат профиля шероховатой поверхности (индексы относятся к сопряженным поверхностям);

L_m – базовая длина профиля (800 мкм); Γ – интеграл Эйлера второго рода.

Радиус сферических сегментов, набор которых с разной высотой представляют собой

модель поверхности. Радиус эквивалентной поверхности найдем с помощью спектральной

плотности мощности (PSD) для каждой из поверхностей. В этом случае имеем:

$$S_i(\omega) = \frac{G_i^{2(D_i-1)}}{2\ln(\gamma)} \omega^{-(5-2D_i)}; \quad \gamma = 1,5; \quad \omega_L = \frac{1}{L_m} \leq \omega \leq \omega_H = \frac{1}{l_0},$$

где D_i – фрактальная размерность каждой из сопряженных поверхностей; l_0 – наименьший измеряемый шаг профиля.

Определим четвертый спектральный момент:

$$m_4 = \int_{\omega_L}^{\omega_H} \omega^4 \frac{G_i^{2(D_i-1)}}{2\ln(\gamma)} \omega^{-(5-2D_i)} d\omega = \frac{G_i^{2(D_i-1)}}{4D_i \ln(\gamma)} (\omega_H^{2D_i} - \omega_L^{2D_i}).$$

Радиус верхней части выступа выразим как:

$$R_i = \frac{3\sqrt{\pi}}{8\sqrt{m_4}}, \quad i = 1, 2.$$

Приведенный радиус будет равен

$$R_{eq} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}.$$

Пример. Пусть $D = D_1 = 1,53$; $R_{q1} = 1,315$ мкм. Эти параметры позволяют определить $G_i = 6,76 \cdot 10^{-3}$ мкм, тогда:

$$m_4 = \frac{(6,76 \cdot 10^{-3})^{2(1,53-1)}}{4\ln(1,5) \cdot 1,53} \left[\left(\frac{1}{4} \right)^{2 \cdot 1,53} - \left(\frac{1}{800} \right)^{2 \cdot 1,53} \right] = 2,902 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}^{-2}.$$

В этом примере радиус оказывается равным

$$R_1 = \frac{3\sqrt{\pi}}{8\sqrt{2,902 \cdot 10^{-5}}} \cong 123 \text{ мкм}.$$

Дополнительные параметры:

– модуль упругости:

$$E = \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{-1},$$

где μ – коэффициент Пуассона;

– среднее квадратичное отклонение профиля:

$$R_q = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2};$$

– арифметическое среднее:

$$R_a = R_q \sqrt{2/\pi};$$

– шаг по средней линии:

$$S_m = \frac{R_a}{\sqrt{\left(\frac{R_{a1}}{S_{m1}} \right)^2 + \left(\frac{R_{a2}}{S_{m2}} \right)^2}}.$$

Оценка фрактальной размерности по параметрам контактного взаимодействия

Рассмотрим контакт двух поверхностей (рис. 9).

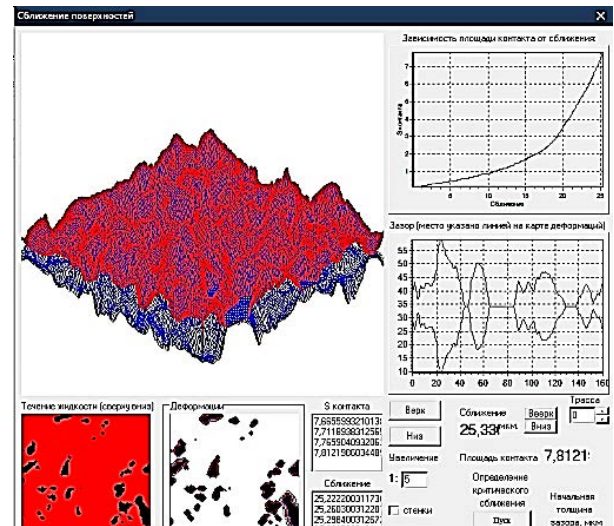


Рис. 9. Карта пятен контакта

Fig. 9. Map of contact spots

При сближении шероховатых поверхностей формируется фактическая площадь контакта (ФПК), состоящая из дискретных пятен разных размеров. Считается, что при увеличении сближения поверхностей площадь среднестати-

стического пятна практически остается постоянной, однако при росте фактической площади контакта растет и площадь максимального пятна a_L (рис. 2). Известная зависимость ФПК от площади максимального пятна и фрактальной размерности характеризуется выражением:

$$A_r = \frac{D}{D-1} a_L, \quad 1,0 < D < 2,0.$$

Функцию $\frac{D}{D-1}$, $D \in [1,1 \dots 1,9]$ можно представить в виде степенной зависимости с индексом детерминации $R^2 = 0,8654$:

$$\frac{D}{D-1} = 10,33D^{-2,66}.$$

Тогда получим:

$$\frac{A_r}{a_L} = 10,33D^{-2,66}.$$

Фрактальная размерность в этом случае равна

$$D = 2,406 \left(\frac{A_r}{a_L} \right)^{-0,376}.$$

Пример. Пусть ФПК равна $A_r = 0,64 \text{ мм}^2$ и площадь максимального пятна $a_L = 0,0078$. Фрактальная размерность окажется равной $D = 1,415$.

Влияние отношения фактической площади к площади максимального пятна показано на рис. 10

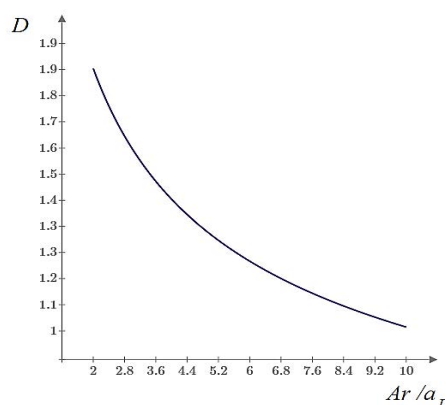


Рис. 10. Зависимость фрактальной размерности от $\frac{A_r}{a_L}$

Fig. 10. Dependence of fractal dimension on $\frac{A_r}{a_L}$

Анализ зависимости, представленной на рис. 10, показал значительное влияние отношения фактической площади контакта к площади максимального пятна. Установлен диапазон изменения рассматриваемого отношения, при котором соблюдается условие $1,0 < D < 2,0$.

Точность оценки фрактальной размерности существенно зависит от точности определения фактической площади и площади максимального пятна контакта.

Процедура определения параметров контактного взаимодействия

Грубая оценка отношения A_r/a_L может быть дана при известной фактической площади контакта, используя карту пятен касания и подсчитав их число. Тогда, разделив ФПК на число пятен, получаем среднюю площадь пятна $a_{ср}$. Максимальную площадь пятна найдем по формуле:

$$a_L = k a_{ср},$$

где $k \cong 3,0$.

Такой подход оправдан известным утверждением [3 – 11]: рост ФПК при увеличении нормальной на стык нагрузки происходит в основном за счет роста пятен контакта, высоты неровностей поверхностного слоя которых имеют вероятностное распределение.

В ряде случаев требуется получить более точную оценку ФПК и площадь максимального пятна. В этом случае эти площади можно определить, например, с помощью метода Монте-Карло.

Выводы

Разработана методика определения фрактальной размерности как поверхности, так и объекта – карты пятен контакта. Установлен диапазон изменения отношения фактической площади контакта к площади максимального пятна. Предложена процедура оценки фрактальной размерности, необходимой для определения параметров контактного взаимодействия шероховатых поверхностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихомиров В.П., Измеров М.А., Тихомиров П.В. Фрактальные модели инженерных поверхностей // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014 № 3(43). С. 72–80.
2. Yan, W. at al. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces/ Journal of Applied Physics 84(7), 3617 (1998).
3. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
4. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 525 с.

5. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.

6. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.

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

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

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

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

11. Тихомиров В. П., Шалыгин М. Г., Измеров М. А. Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. №. 6. С. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-20-27>

REFERENCES

1. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A., Tikhomirov P.V. Fractal models of engineering surfaces // Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2014, No. 3(43), pp. 72–80.

2. Yan, W. et al. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces/ Journal of Applied Physics 84(7), 3617 (1998).

3. Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication): Textbook for technical universities. 2nd ed. of the updated and revised / A.V. Chichinadze, E.D. Brown, N.A. Boucher, et al; under the general editorship of A.V. Chichinadze. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 664 p.

4. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Komalov V.S. Fundamentals of calculations for friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 525 p.

5. Demkin N.B., Ryzhov E.V. Surface quality and contact of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 244 p.

6. Goryacheva I.G., Dobychin M.N. Contact problems in tribology. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 256 p.

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

8. Izmerov M.A., Tikhomirov V.P., Gornostaeva A.G. Fractal surfaces wear under low loads // Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Bryansk Scientific School of Engineering Technologists, Bryansk, 2022, pp. 38–42.

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

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

11. Tikhomirov V.P., Shalygin M.G., Izmerov M.A. Contact model and evaluation of friction force molecular component // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2023, No. 6, pp. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-20-27>

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

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

Статья поступила в редакцию 05.11.2023; одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 02.12.2023

The article was submitted 05.11.2023; approved after reviewing 20.11.2023; accepted for publication 02.12.2023

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

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

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

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

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

Сдано в набор 17.01.2024. Выход в свет 30.01.2024.

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

