

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

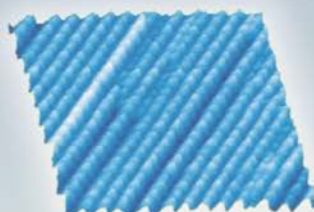
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

3 (165)
2025

**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

№ 3 (165)

2025

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., доц. 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., проф. 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., 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

Луц А.Р. Влияние вида углеродной формы и термической обработки
на структурные характеристики карбидной фазы в составе
композиционного материала Al-5%Cu-10%TiC, полученного методом CBC ... 3

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Курсевич Е.А., Абраменко Ю.С. Материалоемкость, как показатель
технологичности, при изготовлении изделий методами
аддитивной технологии ... 11

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН

Сухов А.В., Фатюхин Д.С. Анализ влияния факторов температуры,
массы и амплитуды колебаний на сборку резьбового соединения
с помощью ультразвука ... 19

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

Болгова Е.А., Мукутадзе М.А., Харламов П.В. Оценка коэффициента
трения и нагрузочной способности модифицированной конструкции
радиального подшипника в турбулентном режиме трения ... 29

Макаренко К.В., Азаркин А.А., Вдовин А.В. Анализ особенностей
механики контакта бандажа и опорных роликов
вращающихся печей ... 38

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

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 3 (165)

2025

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., 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., MYSHKIN N.K. Acad. of NAS Belarus
(Gomel, Belarus)

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

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

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

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

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

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

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

Lutz A.R. Carbon shape type and heat treatment effect on the structural characteristics of the carbide phase in the composite material Al-5%Cu-10%TiC obtained by the SHS method 3

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

Kursevich E.A., Abramenko Yu.S. Material consumption capacity as a technology index for manufacturability in the production when using additive technology methods 11

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MACHINE ASSEMBLY

Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Impact analysis of temperature, mass, and oscillation amplitude on the assembly of a threaded fastening using ultrasound 19

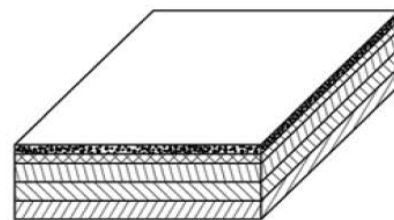
SURFACE LAYER QUALITY, CONTACT INTERACTION, FRICTION AND WEAR OF MACHINE PARTS

Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Kharlamov P.V. Estimated friction and load capacity coefficients for a modified radial bearing design under a turbulent condition friction 29

Makarenko K.V., Azarkin A.A., Vdovin A.V. Analysis of contact mechanics of a bandage and support rolls of rotary kilns 38

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №3 (165). С.3-10.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №3 (165). P.3-10.

Научная статья
УДК 620.16+620.18
doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-3-10

Влияние вида углеродной формы и термической обработки на структурные характеристики карбидной фазы в составе композиционного материала Al-5%Cu-10%TiC, полученного методом СВС

Альфия Расимовна Луц, к.т.н.
Самарский государственный технический университет, Самара, Россия
alya_luts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7889-9931>

Аннотация. В работе приведены результаты исследования влияния вида углеродной формы (технического углерода и многослойных углеродных нанотрубок) на морфологию и характер распределения фазы карбида титана в составе полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза композиционного материала Al-5%Cu-10%TiC, подвергнутого далее термической обработке в виде закалки и искусственного старения. Показано, что обе модификации углерода позволяют изначально синтезировать карбидную фазу высокой дисперсности с размерами до 800 нм. Однако в ходе последующей термической обработки образцов, полученных на основе шихты с нанотрубками, наблюдается снижение дисперсности частиц карбида титана до 2 мкм и повышение степени их агломерированности, что влечет за собой уменьшение упрочняющего эффекта старения. На основе анализа механизма карбидообразования выдвинуто предположение, что в результате высокоскоростного капиллярного растекания титана по поверхности углеродных частиц в процессе синтеза образуются частицы наследуют геометрию исходной углеродной формы. В связи с этим, при использовании технического углерода преимущественным является синтез округлых частиц карбида титана, а в случае нанотрубок – цилиндрических частиц. Различия в морфологии, в свою очередь, определяют различную степень самодиффузии при последующем нагреве, что и приводит к более существенным изменениям дисперсности и характера распределения карбидной фазы в образцах, синтезированных на основе нанотрубок. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что вид углеродной формы оказывает значительное влияние на структурные характеристики карбидной фазы и дают основание рекомендовать к использованию технический углерод, отличающийся и более низкой стоимостью.

Ключевые слова: карбид титана, композиционный материал, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, термическая обработка

Для цитирования: Луц А.Р. Влияние вида углеродной формы и термической обработки на структурные характеристики карбидной фазы в составе композиционного материала Al-5%Cu-10%TiC, полученного методом СВС // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 3 (165). С. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-3-10

Carbon shape type and heat treatment effect on the structural characteristics of the carbide phase in the composite material Al-5%Cu-10%TiC obtained by the SHS method

Alfiya R. Lutz, PhD. Eng.
Samara State Technical University, Samara, Russia
alya_luts@mail.ru

Abstract. The paper presents the analysis of carbon shape type effect (carbon black and multilayer carbon nanotubes) on the morphology and distribution of the titanium carbide phase in the composition of a composite material obtained by self-propagating high-temperature synthesis Al-5%Cu-10%TiC, further subjected to heat treatment as thermo-hardening and artificial ageing. It is shown that both carbon modifications make it possible to synthesize a highly dispersed carbide phase with dimensions up to 800 nm from its inception. However, during the subsequent heat treatment of samples obtained on the basis of a charge with nanotubes, a decrease in the dispersion of titanium carbide particles to 2 microns and an increase in their degree of agglomeration is observed, resulting in a decrease in the hardening effect of ageing. Based on the analysis of the mechanism of carbide formation, it is suggested that as a result of high-speed capillary spreading of titanium over the surface of carbon particles within synthesis, the formed particles inherit the geometry of the original carbon shape. In this regard, when using carbon black, the synthesis of rounded titanium carbide particles is advantageous, and in the case of nanotubes it is cylindrical particles that make the better of. Differences in morphology, in turn, determine the varying degree of self-diffusion during subsequent heating, which contributes to more significant changes in the dispersion and distribution of the carbide phase in samples synthesized on the basis of nanotubes. The obtained results lead to a conclusion that the type of carbon shape has a significant effect on the structural characteristics of the carbide phase and give reason to recommend the use of carbon black, which is characterized by a lower cost.

Keywords: titanium carbide, composite material, self-propagating high-temperature synthesis, heat treatment

For citation: Lutz A.R. Carbon shape type and heat treatment effect on the structural characteristics of the carbide phase in the composite material Al-5%Cu-10%TiC obtained by the SHS method / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-3-10

Введение

Композиционные алюмоматричные материалы, армированные высокодисперсной фазой карбида титана, представляют собой перспективный класс материалов конструкционного назначения с повышенными показателями твердости, прочности и износостойкости [1, 2]. С учетом простоты и доступности оборудования, а также экономической целесообразности, наиболее перспективным для их изготовления является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), предложенный на кафедре «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» Самарского государственного технического университета [3]. Технология включает проведение экзотермического взаимодействия компонентов исходной шихты – элементных порошков титана и углерода, протекающего в расплаве алюминия в режиме горения со значительной скоростью от 1×10^{-4} до 0,15 м/с и с достижением температуры в зоне реакции до 3000 К, что обеспечивает высокую смачиваемость образуемых частиц карбида титана и за счет этого существенное повышение механических и трибологических свойств получаемых композиционных материалов [4, 5]. Качественное повышение указанных характеристик было доказано на составах Al-10%TiC, Al-5%Cu-10%TiC, Al-5%Cu-2%Mn-10%TiC и др. путем

синтеза в их структурах частиц карбида титана с дисперсностью 100 нм – 1 мкм.

В процессе разработки технологии особое внимание уделялось порошковым составам шихты, а именно влиянию размерного фактора и способа получения исходных порошков титана и углерода на полноту протекания процесса СВС и дисперсность получаемой карбидной фазы. Было установлено, что все исследуемые марки порошка титана: ПТМ (с дисперсностью < 80 мкм), ПТХ6-1 (< 180 мкм) и ТПП-7 (< 280 мкм), отличаются хорошей реакционной способностью и могут использоваться для синтеза карбида титана, но его максимальную дисперсность обеспечивает использование порошка ТПП-7, обладающего пористой структурой и за счет этого легко распадающегося на отдельные элементы с последующим химическим взаимодействием с углеродом [6].

Другая часть исследований, посвященная изучению влияния модификации углеродной формы, позволила установить, что, хотя все рассмотренные формы: активированный уголь марок БАУ и АГ-2, коллоидный графит С-1, технический углерод марок Т-900 и П-701 и углеродные нанотрубки (УНТ) «Таунит»TM, способны вступать во взаимодействие с титаном, но минимальную дисперсность карбидной фазы, порядка 200...300 нм, обеспечивает использование только технического углерода П-701 и УНТ «Таунит»TM. Применение

остальных углеродных форм не позволяет провести СВС в полной мере, о чем свидетельствует наличие свободного углерода в составе матрицы и образование нежелательных побочных фаз типа Al_4C_3 или Al_3Ti .

Также ранее было установлено, что дисперсность соединения карбида титана в результате СВС-процесса существенно зависит от химического состава матричной основы. И, например, присутствие 5 % меди, которую можно рассматривать как инертную добавку, ведет к снижению температуры СВС-реакции и ее замедлению, в результате чего образуются

частицы карбида титана успевают коагулировать и их дисперсность несколько снижается: при использовании технического углерода П-701 дисперсность составляет 200...500 нм, а с УНТ «Таунит»TM – уже 250...800 нм [7]. Но даже такая незначительная разница в размерных параметрах синтезируемых частиц карбида титана оказывает влияние на их механические показатели (табл. 1), что свидетельствует о необходимости сохранения уровня дисперсности армирующей фазы в ходе дальнейших технологических операций.

1. Механические свойства синтезируемых композиционных материалов

1. Mechanical properties of synthesized composite materials

Состав	Испытания на растяжение		Испытания на сжатие		Твердость НВ
	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Напряжение сжатия σ_s , МПа	Относительное укорочение %	
Al-5%Cu	135	18	-	-	48
Al-5%Cu-10%TiC (П-701)	223	6,0	278	59,70	63
Al-5%Cu-10%TiC (УНТ)	203	6,0	241	63,22	63

Вместе с тем, для матричной основы алюминий-медь наибольшее упрочнение достигается в процессе термической обработки по режиму Т6, включающему закалку и старение. И в работе [8] приводится сравнительная оценка свойств композиционных материалов на основе Al-5%Cu, полученных путем ввода 0,1...1,0 % масс. наноразмерных частиц TiC_p и 1,0...5,0 % масс. микроразмерных TiC_p с последующей термической обработкой всех образцов по режиму: выдержка 12 ч при 538 °С, закалка в воду и старение 10 ч при 165 °С. Установлено, что износостойкость наноразмерных материалов с содержанием 0,5 % масс. TiC на 83,5 % выше, чем у матричного сплава Al-Cu при 180 °С при 20 Н и на 16,5 % выше, чем у композита с 5 % масс. микроразмерных частиц TiC. Полученные результаты еще раз доказывают преимущество использования именно высокодисперсной армирующей фазы. Однако, в приведенном примере использовались готовые частицы карбида титана, полученные одним способом и отличающиеся лишь дисперсностью, тогда как в СВС-процессах формирование карбидной фазы происходит

непосредственно в расплаве и вопрос о влиянии вида углеродной формы в ходе нагрева на форму и дисперсность образующейся армирующей фазы в достаточной степени не изучен. В связи с этим, в рамках данной работы была поставлена цель провести оценку влияния формы углерода и термической обработки на дисперсность и равномерность распределения фазы карбида титана в составе композиционного материала Al-5%Cu-10%TiC, полученного методом СВС.

Исследования

Синтез композиционного материала Al-5%Cu-10%TiC проводился путем ввода взятых в стехиометрическом соотношении порошков титана марки ТПП-7 (ТУ 1715-449-05785388-99) и поочередно двух углеродных форм – углерода марки П-701 и УНТ «Таунит»TM – в расплав Al-5%Cu, разогретый до температуры 900 °С в графитовом тигле плавильной печи ПП 20/12. Морфология и исходные характеристики углеродных форм представлены на рис. 1 и в табл. 2, 3.

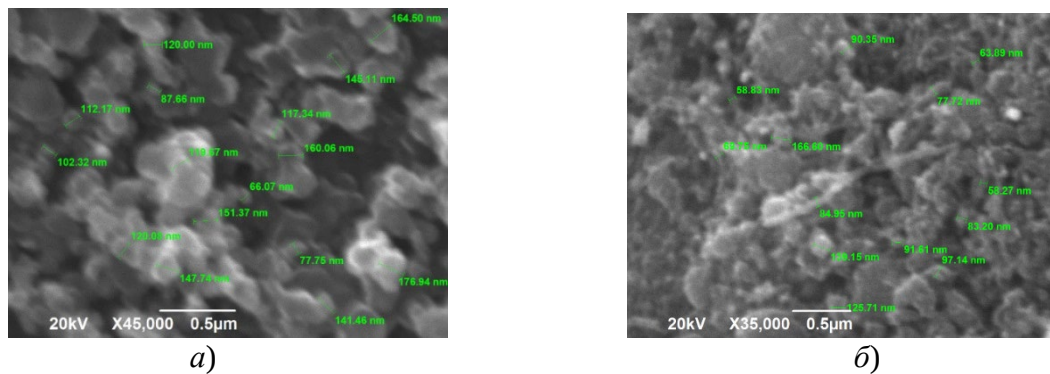


Рис. 1. Морфология и размеры форм углерода:
а – технический углерод П-701; б – УНТ «Таунит»™

Fig. 1. Morphology and dimensions of carbon forms:
a – carbon black P-701; b – CNT «Taunite»™

2. Характеристика технического углерода П-701 (ГОСТ 7885-86)

2. Characteristics of carbon black P-701 (GOST 7885-86)

Марка	Содержание элементов, %			Размер частиц, мкм
	C	Si, Fe	S	
П-701	осн.	0,7	1,1	0,15

3. Характеристики УНТ «Таунит» (ТУ 2166-001-02069289-2007) [9]

3. Characteristics of CNT "Taunit" (TS 2166-001-02069289-2007) [9]

Марка	Содержание элементов, %		Размер частиц, нм/мкм
	C	Общий объем примесей	
Многослойные углеродные нанотрубки «Таунит»™	99	≤ 1,0	Внешний диаметр 20...50 нм, внутренний диаметр 10...20 нм, длина ≥ 2 мкм

Термическая обработка в виде выдержки при 535 °С в течение 1 ч, заковки в воду и искусственного старения при 170 °С в течение 1 ч проводилась в лабораторных камерных печах СНОЛ. Микроструктурный анализ осуществляли на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390A. Оценка степени равномерности распределения армирующих частиц по объему производилась с применением программной разработки для анализа структур литых металломатричных композиционных материалов на основе платформы ImageJ [10], согласно которой степень равномерности распределения частиц автоматически определяется как отношение стандартного отклонения к среднему арифметическому их числа. Полученное числовое значение может варьироваться от 0 до 1, где нулевое значение означает

совершенно однородное распределение, а единица соответствует крайне неравномерному (агломерированному) распределению. Твердость образцов исследовалась на твердомере ЗИП ТК-2М по методу Бринелля по ГОСТ 9012-59.

Результаты

Анализ микроструктур образцов композиционного материала Al-5%Cu-10%TiC (рис. 2) позволил установить, что в случае применения технического углерода П-701 после термической обработки уровень дисперсности частиц карбида титана сохраняется на уровне 200...500 нм, а равномерность их распределения незначительно уменьшается – с 0,16 до 0,28 (рис. 2, в, г).

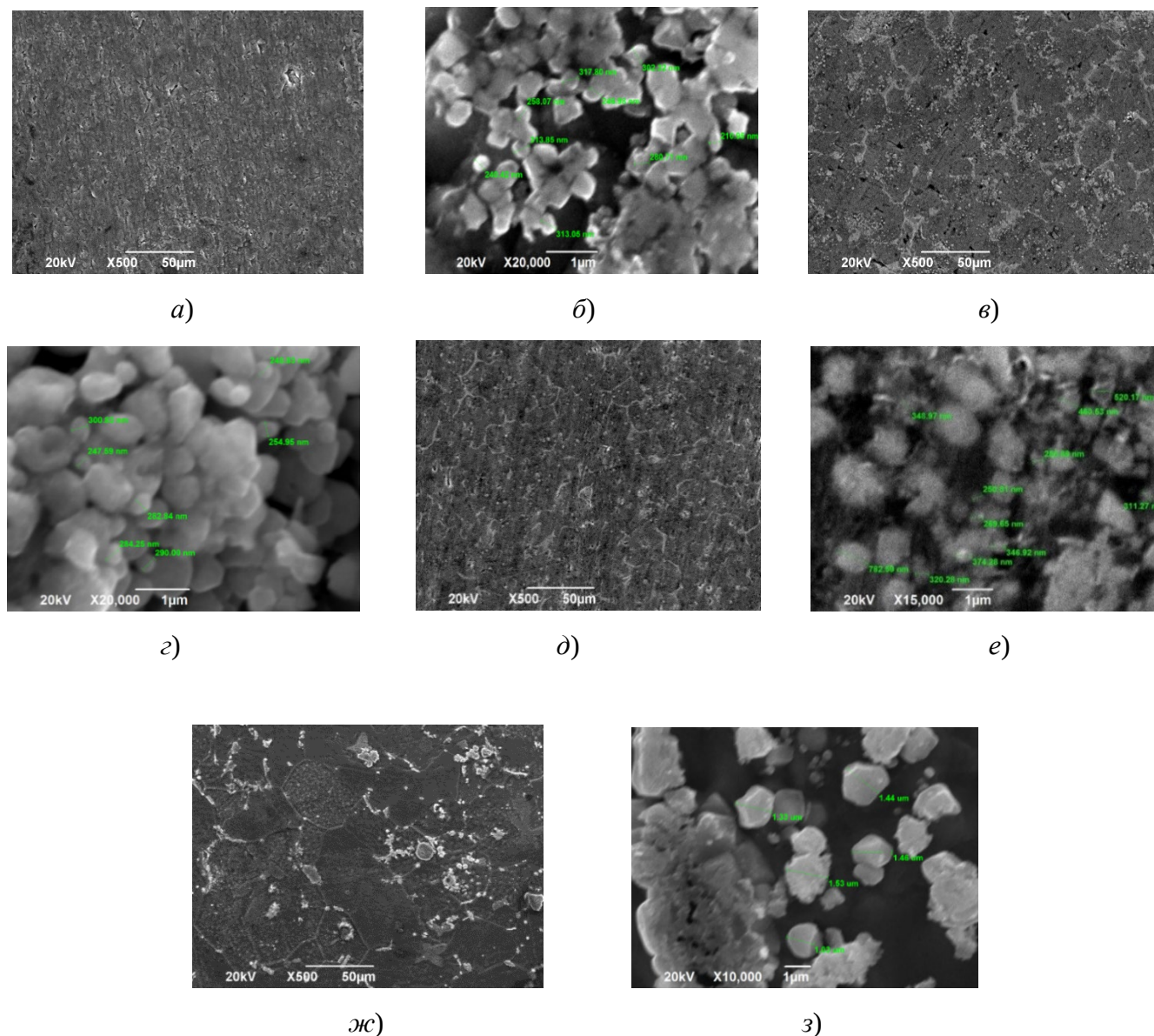


Рис. 2. Микроструктура образцов композиционного материала Al-5%Cu-10%TiC с разными формами углерода в составе шихты:

a, b – порошок титана ТПП-7 и технический углерод П-701 до термической обработки; *в, г* – порошок титана ТПП-7 и технический углерод П-701 после термической обработки; *д, е* – порошок титана ТПП-7 и УНТ «Таунит»™ до термической обработки; *ж, з* – порошок титана ТПП-7 и УНТ «Таунит»™ после термической обработки

Fig. 2. Microstructure of samples of composite material Al-5%Cu-10%TiC with different forms of carbon in the furnace charge:

a, b – titanium powder TPP-7 and carbon black P-701 before heat treatment; *c, d* – titanium powder TPP-7 and carbon black P-701 after heat treatment; *e, f* – titanium powder TPP-7 and CNT «Taunit»™ before heat treatment; *g, h* – titanium powder TPP-7 and CNT «Taunit»™ after heat treatment

Однако при использовании УНТ «Таунит»™ дисперсность частиц снижается с 250...800 нм до 1...2 мкм, а равномерность распределения – с 0,18 до 0,59, что свидетельствует о более высоком уровне агломерированности (рис. 2, *ж, з*). При этом значения твердости после термической обработки для образцов с П-701 и УНТ повысились с 63 НВ до 106 и

91 НВ соответственно, из чего следует наличие эффекта старения в обоих случаях, но степень упрочнения, очевидно, определяется структурными показателями карбидной фазы.

С целью интерпретации результатов необходимо уточнить, что взаимодействие между компонентами исходной смеси в процессе СВС протекает в узкой волне горения и

распространяется с высокой скоростью, т. е. размерная неравномерность компонентов шихты может привести к неоднородности получаемого продукта. Согласно модели, предлагаемой в работе [11], механизм образования карбида титана включает капиллярное растекание, т. е. плавление частиц титана во фронте горения с последующим растеканием по поверхности углеродных частиц, в связи с чем синтезируемый продукт должен наследовать геометрию частиц углеродной формы. Подтверждением этому могут служить результаты, приводимые в работе [12], где исследовалась возможность СВС карбида титана в среде аргона при давлении 1 МПа из аналогичных порошковых смесей после их предварительного прессования с давлением 15 кг/см².

Приведенные на рис. 3 микроструктуры позволяют убедиться в том, что в случае применения технического углерода, сажевые частицы которого, как правило, шарообразной формы и представляют собой рыхлые цепные образования-агломераты размером 0,2...0,8 мкм, частицы образуемого карбида титана также представляют собой

преимущественно спекшиеся частицы глобулярной или овальной формы. Тогда как при использовании УНТ, представляющих собой графеновую плоскость, свернутую в рулон [13], отчетливо наблюдаются отдельные частицы цилиндрической формы, в некоторых случаях с острыми гранями.

Известно, что наиболее вероятной трехмерной формой частиц, образуемых по механизму «снизу-вверх», является шарообразная, поскольку она отвечает минимуму энергии [14], поэтому для наносистем характерным является процесс объединения частиц в более крупные и округлые агломераты с целью уменьшения их общей площади поверхности. В связи с этим, очевидно, проведение в ходе термических операций дополнительного нагрева повышает энергию активации рассматриваемых систем и запускает процессы самодиффузии, которые приводят к повышению степени агломерированности в обоих случаях, но именно в случае вытянутых частиц карбида титана, образованных с применением УНТ, данный эффект более выражен.

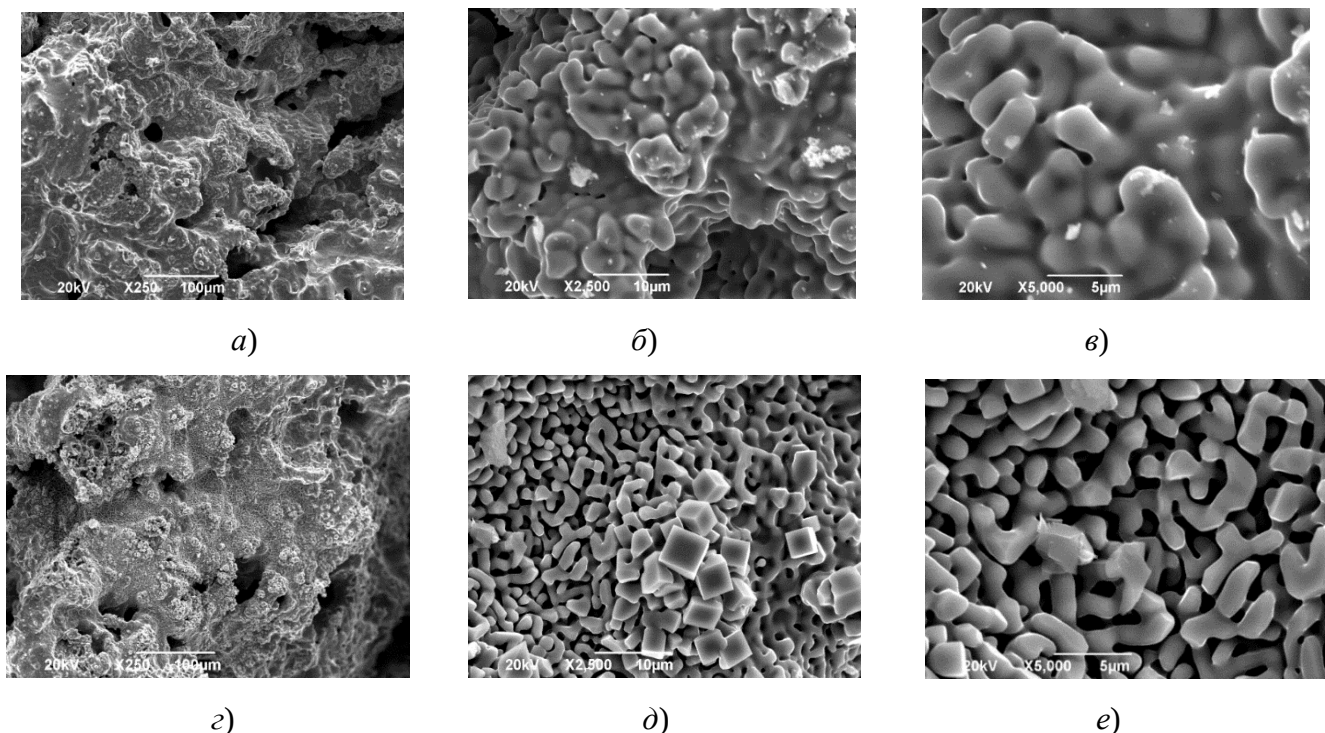


Рис. 3. Микроструктура карбида титана, полученного из смеси порошков при горении в среде аргона:
а, б, в – порошок титана ТПП-7 и технического углерода П-701; в, з, д – порошок титана ТПП-7 и УНТ «Таунит»™

Fig. 3. Microstructure of titanium carbide obtained from a mixture of powders in combustion of argon medium:
а, b, c – titanium powder TPP-7 and carbon black P-701; d, e, f – titanium powder EP-7 and CNT «Taunit»™

Заключение

На основании полученных результатов можно заключить, что исходная форма углерода оказывает существенное влияние на размерные показатели и характер распределения фазы карбида титана, в особенности после проведения термической обработки, в связи с чем, для использования в процессах СВС следует рекомендовать менее склонный к агломерированию технический углерод марки П-701, который к тому же отличается и более низкой стоимостью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kar A., Sharma A., Kumar S. A Critical Review on Recent Advancements in Aluminium-Based Metal Matrix Composites // *Crystals*, 2024. 14. P. 412. DOI: 10.3390/cryst14050412
2. Das B., Roy S., Rai R.N., Saha S.C. Studies on effect of cutting parameters on surface of Al-Cu-TiC MMCs: An Artificial Neural Network Approach // *Procedia Computer Science*, 2015. Vol. 45. P. 745–752. DOI: 10.1016/j.procs.2015.03.145
3. Amosov A.P., Luts A.R., Latukhin E.I., Rybakov A.D., Novikov V.A., Shipilov S.I. Effect of alloying on the structure and properties of particle reinforced aluminum matrix composites Al/TiC produced by SHS in aluminum melt // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018. 1115. 042002. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/4/042002
4. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Юхвид В.И., Боровинская И.П. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: М.: Издательство «БИНОМ», 1999. 176 с.
5. Cochapin B., Gauthier V., Vrel D., Dubois S. Crystal growth of TiC grains during SHS reactions // *Journal of Crystal Growth*, 2007. 304 (2). P. 481–486. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2007.02.018
6. Амосов А.П., Луц А.Р., Латухин Е.И., Ермошкин А.А. Применение процессов СВС для получения in-situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами: обзор // *Изв. Вузов. Цветная металлургия*, 2016. №1. С. 39–49
7. Амосов А.П., Луц А.Р., Рыбаков А.Д., Латухин Е.И. Применение различных

порошковых форм углерода для армирования алюмоматричных композиционных материалов углеродом и карбидом титана // *Обзор. Известия вузов. Цветная металлургия*, 2020. № 4. С. 44–64.

8. Tian W.S., Zhao Q.L., Zhao C.J., Qiu F., Jiang Q.C. The Dry Sliding Wear Properties of Nano-Sized TiCp /Al-Cu Composites at Elevated Temperatures // *Materials*, 2017. 10. P. 939. DOI: 10.3390/ma10080939

9. ТУ 2166-001-02069289-2007. Материал углеродный наноструктурный «ТАУНИТ». Технические условия. Введ. с 01.04.2008. Тамбов: Тамбовский ИТЦ машиностроения, 01.04.2008. 21 с.

10. Prusov E.S., Shabaldin I.V., Deev V.B. Quantitative characterization of the microstructure of in situ aluminum matrix composites // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 2131 (4). P. 042040. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042040

11. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В., Максимов Ю.М., Юхвид В.И. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Дом МИСиС, 2011. 377 с.

12. Rybakov A.D., Luts A.R., Latukhin E.I., Amosov A.P. Carbon form influence on combustion synthesis of titanium carbide // *AIP Conference Proceedings*, 2020. 2304. 020030. DOI: 10.1063/5.0034549.

13. Колокольцев С.Н. Углеродные материалы. Свойства, технологии, применения. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. 296 с.

14. Физические явления в ультрадисперсных средах / И.Д. Морохов, Л.И. Трусов, В.Н. Лаповник. М.: Энергоатомиздат, 1984. 224 с.

REFERENCES

1. Kar A., Sharma A., Kumar S.A. Critical Review on Recent Advancements in Aluminium-Based Metal Matrix Composites // *Crystals*, 2024. 14. P. 412. DOI: 10.3390/cryst14050412
2. Das B., Roy S., Rai R.N., Saha S.C. Studies on effect of cutting parameters on surface of Al-Cu-TiC MMCs: An Artificial Neural Network Approach // *Procedia Computer Science*, 2015. Vol. 45. P. 745–752. DOI: 10.1016/j.procs.2015.03.145
3. Amosov A.P., Luts A.R., Latukhin E.I., Rybakov A.D., Novikov V.A., Shipilov S.I. Effect of alloying on the structure and properties of particle

reinforced aluminum matrix composites Al/TiC produced by SHS in aluminum melt // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018. 1115. 042002. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/4/042002

4. Levashov E.A., Rogachev A.S., Yuxhvid V.I., Borovinskaya I.P. *Physico-chemical and technological foundations of self-propagating high-temperature synthesis*: Moscow: BINOM Publishing House, 1999, 176 p.

5. Cochevin B., Gauthier V., Vrel D., Dubois S. Crystal growth of TiC grains during SHS reactions // *Journal of Crystal Growth*, 2007. 304 (2). P. 481–486. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2007.02.018

6. Amosov A.P., Lutz A.R., Latukhin E.I., Ermoshkin A.A. Application of SHS processes for in situ production of aluminum-matrix composite materials discretely reinforced with nanoscale ceramic particles: a review // *Izv. Vuzov. Tsvetnaya Metallurgia*, 2016, no. 1, pp. 39–49

7. Amosov A.P., Lutz A.R., Rybakov A.D., Latukhin E.I. Application of various powdered forms of carbon for reinforcement of aluminum-matrix composite materials with carbon and titanium carbide. *Izv. Vuzov. Tsvetnaya Metallurgia*, 2020, no. 4. pp. 44–64.

8. Tian W.S., Zhao Q.L., Zhao C.J., Qiu F., Jiang Q.C. The Dry Sliding Wear Properties of Nano-Sized TiCp /Al-Cu Composites at Elevated

Temperatures // *Materials*, 2017. 10. P. 939. DOI: 10.3390/ma10080939

9. TS 2166-001-02069289-2007. The material is carbon nanostructured «TAUNITE». Technical specifications. Introduced on 04/01/2008. Tambov: Tambov ITC of Mechanical Engineering, 04/01/2008, 21 p.

10. Prusov E.S., Shabaldin I.V., Deev V.B. Quantitative characterization of the microstructure of in situ aluminum matrix composites // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 2131 (4). P. 042040. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042040

11. Levashov E.A., Rogachev A.S., Kurbatkina V.V., Maksimov Yu.M., Yuxhvid V.I. *Promising materials and technologies of self-propagating high-temperature synthesis*. Moscow: Dom MISiS, 2011. 377 p.

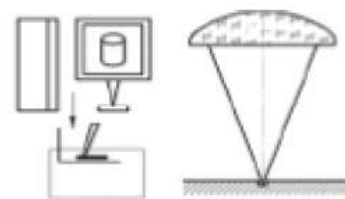
12. Rybakov A. D., Luts A. R., Latukhin E. I., Amosov A.P. Carbon form influence on combustion synthesis of titanium carbide // *AIP Conference Proceedings*, 2020. 2304. 020030. DOI:10.1063/5.0034549.

13. Kolokoltsev S.N. *Carbon materials. Properties, technologies, and applications*. Dolgoprudny: Publishing House «Intellect», 2012, 296 p.

14. *Physical phenomena in ultrafine media* / I.D. Morokhov, L.I. Trusov, V.N. Lapovnik. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 224 p.

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.

The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 16.12.2024; assepted for publication 20.12.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №3 (165). С.11-18.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №3 (165). P.11-18.

Научная статья
УДК 621.9.06
doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-11-18

Материалоемкость, как показатель технологичности, при изготовлении изделий методами аддитивной технологии

Евгения Андреевна Курсевич¹, аспирант
Юрий Сергеевич Абраменко², к.т.н.

^{1,2} ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Россия

¹ ingénue@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

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

Аннотация. В данной статье рассмотрены способы оценки материалоемкости изделий при изготовлении методами аддитивных технологий (АТ). Рассмотрены исследования, проведенные по данной теме разными авторами, применительно к аддитивному производству. Проанализированы способы расчётов материалоемкости, сделаны выводы об изученности вопроса. Проведены расчёты материалоемкости комплекта деталей, изготовленного двумя разными способами – механической обработкой и методом АТ. Рассчитаны коэффициенты использования материала, рассчитана стоимость материалов, затраченных на изготовление деталей, механической обработкой и методом АТ. Проведён сравнительный анализ стоимости заготовок. Сделаны выводы о невозможности однозначного предпочтения выбора изготовления деталей по такому критерию, как коэффициент использования материала. Сделаны выводы о необходимости дальнейшего исследования технологичности изделий при изготовлении изделий с помощью АТ.

Ключевые слова: технологичность конструкции изделия, материалоемкость, коэффициенты технологичности, аддитивные технологии

Для цитирования: Курсевич Е.А., Абраменко Ю.С. Материалоемкость, как показатель технологичности, при изготовлении изделий методами аддитивной технологии // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 3 (165). С. 11–18. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-11-18

Material consumption capacity as a technology index for manufacturability in the production when using additive technology methods

Evgenia A. Kursevich¹, PhD student
Yuri S. Abramenko², PhD Eng.

^{1,2} FSUE «RFNC-All-Russian Research Institute of applied physics named after Academician E.I. Zababakhin»,
Snezhinsk, Russia

¹ ingénue@yandex.ru

² vniitf@vniitf.ru

Abstract. *Ways of characterization for material consumption capacity of products manufacture using additive technologies (AT) is viewed in the article. The research conducted on this topic by various authors in relation to additive manufacturing is discussed. The methods of calculating the material consumption capacity are analyzed, conclusions concerning previous studies are drawn. The calculations of the material consumption capacity for a full set of components were made using two different techniques – machine working and the AT method. The material utilization ratios are found, the cost of materials spent on the manufacture of parts by machine working and using AT technique is calculated. A comparative analysis of the cost of raw material was carried out. Conclusions are drawn about the impossibility of an unambiguous preference for the choice of manufacturing parts based on such criteria as the material utilization ratio. It has been concluded that further research of the manufacturability of products using AT is quite indispensable.*

Keywords: adaptability of product design, material consumption capacity, handling properties coefficients, additive technologies

For citation: Kursevich E.A., Abramenko Yu.S. Material consumption capacity as a technology index for manufacturability in the production when using additive technology methods / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 11–18. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-11-18

Введение

В современной производственной отрасли наблюдается активный рост использования аддитивных технологий. Эти технологии зарекомендовали себя не только как средство для прототипирования, но и как полноценные производственные решения. Это особенно стало очевидно в последние года, ведь даже там, где эти технологии не рассматривались серьезно, например, в военно-промышленном комплексе, авиастроении и других, начинается ускоренное внедрение и адаптация производственных процессов к современным условиям производства. Этот факт ставит вопрос об эффективном и целесообразном применении аддитивных технологий (АТ) при изготовлении различной продукции.

Эффективность использования любого процесса производства можно оценить с помощью разных показателей, но основные из них это показатели, характеризующие потребление ресурсов – материала, труда, энергии. В свою очередь оптимальное соотношение затрат ресурсов на производство определяется технологичностью конструкции изделия для данного вида производства [1].

Рассмотрим один из ключевых аспектов оценки технологичности изделий для производства – материалоемкость изделий, применительно к процессу изготовления методом АТ.

В отличие от традиционных технологий

обработки, аддитивные методы позволяют более рационально использовать материалы. Послойное изготовление деталей минимизирует отходы и позволяет задействовать только необходимое количество сырья. Кроме того, конструкция изделий, оптимизированная для АТ, может предусматривать полые внутренние элементы, что снижает общую материалоемкость [2].

Но есть и ряд недостатков при учёте материалоемкости такого изделия:

- необходимость добавления поддержек в модель изделия для 3D-печати не редко является обязательным действием из-за конструктивных особенностей и при этом вес поддержек может составлять почти полный вес основного изделия, а их удаление приводит к решению дополнительных технологических задач;

- детали, полученные методом аддитивных технологий чаще всего, не полностью соответствуют требованиям конструкторской документации и требуют дополнительной обработки, что влечёт за собой возможные затраты материала на изготовление технологической оснастки для закрепления детали на механических операциях;

- стоимость материала для 3D-печати намного выше, чем стоимость этого же материала, полученного литьем или прокатом. Например, стоимость одного килограмма порошка 12X18H10T примерно 25 тыс. на рынке в зависимости от изготовителя, а стоимость заготовки из круга того же материала

приблизительно в 35 раз ниже.

Таким образом, разработка критериев оценки материалоемкости конструкций при производстве методами аддитивных технологий является важной научной и практической задачей.

Задача данного исследования – определение особенностей материалоемкости изделия при изготовлении методом аддитивных технологий, с учётом их возможностей, достоинств и недостатков.

Исследование

Рассмотрим опыт исследования материалоемкости изделия, как одного из основных показателей технологичности изделия, рассмотрим расчёт стоимости материала с учётом коэффициентов использования материала.

В разных научных работах зарубежных и отечественных авторов всесторонне рассматривается материалоемкость изделий. Рассмотрим основные положения из них.

Основной показатель материалоемкости – коэффициент использования материала. Рассмотрим формулу для расчёта коэффициента материалоемкости с учётом особенностей аддитивных технологий. Коэффициент материалоемкости K_M можно определить по следующей формуле:

$$K_M = \frac{M_d + M_n}{M_n}, \quad (1)$$

где M_d – масса материала, израсходованного на изготовление основной детали; M_n – масса материала, израсходованного на изготовление поддерживающих конструкций; M_n – масса готового изделия [3].

Таким образом, этот коэффициент материалоемкости учитывает как материал, необходимый для изготовления самой детали, так и дополнительный материал, требующийся для создания поддерживающих конструкций.

Формула (1) отражает только самые очевидные затраты материала при изготовлении АТ. В работах зарубежных

авторов, которые всесторонне рассматривают материалоемкость таких технологий, предлагаются новые коэффициенты для оценки данных процессов. Так как в исследованиях [3 – 8] отмечается, что для большинства аддитивных технологий K_M составляет 0,3...0,6, что означает высокие потери материала в процессе производства и это влечёт за собой необходимость применять более детальный подход к расчёту материалоемкости. Например, помимо коэффициента использования материала предлагается использовать показатель удельной массы материала:

$$K_M = \frac{M_T}{V_T} \quad (2)$$

где M_T – масса готового изделия; V_T – объем готового изделия [4].

Этот показатель позволяет оценить эффективность использования материала с учётом геометрии и плотности изготавливаемого изделия.

Кроме того, рассматривается влияние ориентации изделия на платформе на материалоемкость. Авторы предлагают использовать коэффициент ориентации:

$$K_{OP} = \frac{M_n}{M_o}, \quad (3)$$

где M_n – масса материала, использованного на поддерживающие конструкции; M_o – общая масса потребленного материала [5].

Ориентация изделия, требующая меньшего объема поддерживающих структур, позволяет снизить расход материала. Таким образом, для всесторонней оценки материалоемкости при аддитивном производстве следует учитывать следующее: коэффициент использования материала; удельную массу материала; коэффициент ориентации; влияние геометрической сложности, плотности заполнения и типа аддитивной технологии [6].

Комплексное применение этих показателей позволит более точно оценить эффективность использования материалов в

аддитивном производстве.

Еще один важный фактор – возможность повторного использования неиспользованного сырья (нерасплавленного порошка, остаточных материалов и т. д.). Если эти материалы могут быть эффективно переработаны и вновь использованы в производственном процессе, то это позволит значительно повысить общий коэффициент.

Помимо этого, при оценке материалоемкости необходимо учитывать возможность использования вторичных материалов вместо первичных. Применение таких материалов может значительно снизить общий объем потребляемых ресурсов.

Таким образом, можно оценить и минимизировать все составляющие, которые влияют на материалоемкость, с целью повышения эффективности использования материалов.

Помимо рассмотренных ранее показателей, при оценке материалоемкости аддитивного производства важно также учитывать влияние стадии постобработки. На этапе постобработки возникают дополнительные потери материала, например, при механической обработке для достижения требуемой геометрической точности. Такие потери могут существенно снизить общий коэффициент использования материала.

Но даже с учётом всех потерь и с применением всех мероприятий по экономичному использованию материала, невозможно однозначно сказать экономично ли изготовление деталей с помощью АТ, рассчитав только затраты на материал.

Необходимо провести сравнительный анализ с традиционными методами производства.

Ведь выбор способа производства – становится краеугольным камнем для обеспечения конкурентоспособности предприятия, выполнения сроков изготовления, а также обеспечения высокого качества изделий.

Если речь идёт о деталях, которые

невозможно изготовить другими методами, кроме АТ, то выбор определен, но тогда вопросы уже к конструкции изделия: действительно ли целесообразна такая конструкция? Обоснованно ли ограничение способа производства?

Для оценки материалоемкости был изготовлен комплект деталей двумя методами – механической обработкой и методом аддитивных технологий. После 3D-печати была проведена доработка рабочих поверхностей деталей, удалены поддержки, шероховатость доведена до требований конструкторской документации.

Расчеты

Рассчитаем материалоемкость трех деталей для изготовления механической обработкой и методом аддитивных технологий.

1. Деталь «Цилиндр» (рис. 1). Масса детали 0,16 кг. Материал заготовки 12X18H10T.

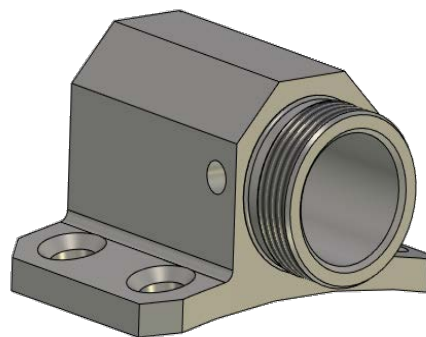


Рис. 1. Цилиндр

Fig. 1. Cylinder

1.1. При изготовлении механическим способом: заготовка 12X18H10T круг 70; $M = 2,07$ кг; коэффициент использования материала 0,08. Низкий коэффициент и стоимость заготовки составляет 841,45 руб.

1.2. При изготовлении методом АТ: заготовка – порошок 12X18H10T; $M = 0,20$ кг (с учётом удалённых поддержек и потерь материала на доработку рабочих поверхностей); коэффициент использования материала 0,8. Высокий коэффициент. Стоимость порошка для 3D-печати 12X18H10T

на рынке в зависимости от производителя ~ 25000 руб., т. е. материал на изготовление данной детали стоит 5000 руб. Это в шесть раз выше, чем стоимость заготовки из круга.

2. Деталь «Рычаг» (рис. 2). Масса детали – 0,119 кг. Материал заготовки: 12X18H10T.

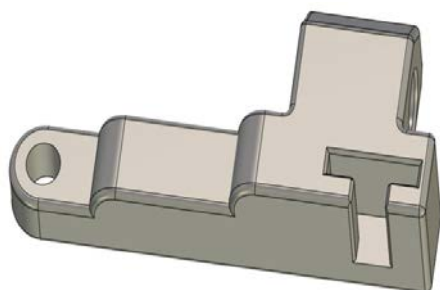


Рис. 2. Рычаг

Fig. 2. Lever

1.1 При изготовлении механическим способом: заготовка 12X18H10T круг 40; $M = 0,82$ кг; коэффициент использования материала 0,15. Низкий коэффициент, стоимость заготовки составляет 333 руб.

1.2 При изготовлении методом АТ6: заготовка – порошок 12X18H10T; $M = 0,17$ кг (с учётом удаленных поддержек и потерь материала на доработку рабочих поверхностей); коэффициент использования материала 0,7. Материал на изготовление данной детали стоит 4165 руб. Это в 13 раз

выше, чем стоимость заготовки из круга.

3. Деталь «Крючок» (рис. 3). Масса детали – 0,046 кг. Материал заготовки: 12X18H10T.

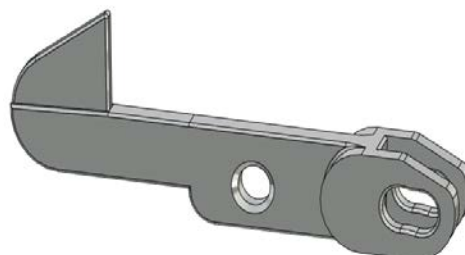


Рис. 3. Крючок

Fig. 3. Hook

1.3 При изготовлении механическим способом: заготовка 12X18H10T лист 16; $M = 0,72$ кг; коэффициент использования материала 0,06. Низкий коэффициент, стоимость заготовки составляет 360 руб.

1.4 При изготовлении методом АТ: заготовка – порошок 12X18H10T; $M = 0,064$ кг (с учётом удаленных поддержек потерь материала на доработку рабочих поверхностей); коэффициент использования материала 0,7. Материал на изготовление данной детали стоит 1600 руб., что в 4 раз выше, чем стоимость заготовки из листа. Сведем данные расчёты в табл. 1.

1. Расчет стоимости материала для изготовления деталей с учетом коэффициента использования материала

1. Calculation of the cost of the material for the parts manufacture, taking into account the material utilization ratio

Деталь	Метод изготовления	Коэффициент использования материала	Стоимость материала заготовки, руб.
Цилиндр	Механическая обработка	0,08	841
	Аддитивные технологии	0,80	5000
Рычаг	Механическая обработка	0,15	333
	Аддитивные технологии	0,70	4165
Крючок	Механическая обработка	0,06	360
	Аддитивные технологии	0,70	1600

Несмотря на то, что K_M для аддитивного производства гораздо выше, чем при механической обработке, сама стоимость заготовки выходит гораздо дороже, что видно из табл. 1. Причем стоимость отличается от 4 до 13 раз. Это слишком большая разница, чтобы её игнорировать при выборе способа производства. Конечно, это обусловлено стоимостью порошков для 3D-печати и со временем, с развитием технологий, стоимость будет снижаться, но этот процесс медленный и постепенный, а на данном этапе говорить об экономичности АТ, по сравнению с механической обработкой из-за высокого коэффициента использования материала, по меньшей мере, некорректно.

Выводы

По результатам проведенного исследования оценки материалоемкости, как показателя технологичности, при изготовлении изделий методами аддитивной технологии, можно сделать следующие выводы:

1. Для рационального использования аддитивных технологий необходимо разработать научно обоснованные критерии оценки технологичности не только с учётом особенностей АТ, но и с возможностью сравнения с традиционными методами производства;

2. Коэффициент использования материала при аддитивных технологиях, даже при выполнении всех мероприятий по оптимизации использования материала и с возможностью рециркуляции, переработки отходов, все равно не равен единице. С учётом высокой стоимости материалов для АТ затраты на материал гораздо выше, чем при механической обработке, даже в том случае, когда для изготовления механической обработкой коэффициент использования материала очень низкий.

3. Оценка материалоемкости должна носить комплексный характер, с учётом достоинств и недостатков аддитивных технологий, с проработкой мероприятий по рациональному использованию материала и самих АТ, что позволит снизить себестоимость продукции и экологическую нагрузку при производстве изделий.

4. Оптимальность решения по выбору метода изготовления деталей должна основываться на расчётных данных и на подтверждаемых коэффициентах для обеспечения конкурентоспособности предприятия. Это особенно актуально сейчас, когда срок от идеи до внедрения и производства изделий становится все меньше.

5. Определение рационального расхода материальных ресурсов является важным критерием при выборе оптимальных технологических решений и обеспечения эффективности производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 14.205–83. Технологичность конструкции изделий. Введ. 1983–04–01. М.: Издательство стандартов, 1983. 11 с.
2. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. Санкт–Петербург, 2013. 222 с.
3. Meng Y., Zhang Y. Design for additive manufacturing: A review of case studies // Assembly Automation. 2014. Vol. 34, no. 4. P. 274–283. doi: 10.1108/AA-04-2014-047.
4. Guvendiren M., Molde J., Soares R.M.D., Kunkel E., Smith B., Padilla P. Impact of design and process parameters on mechanical properties of 3D printed parts // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 38. 101804
5. Kheifetz M.L. From Information and Additive Technologies to Self-Reproduction of Machines and Organisms // Advanced Materials and Technologies. 2018. No. 1. P. 22–35. DOI 10.17277/amt.2018.01. pp. 022–035. EDN XWDLAD
6. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 656 с. ISBN 978–5–94836–447–6
7. Tomlin M., Meyer J. Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part. In Proceedings of the Proceeding of the 7th Altair CAE technology conference; 2011; pp. 1–9.
8. Аддитивные технологии [Электронный ресурс]: практикум / Л.В. Беляев, А.В. Жданов; Владим. гос. ун–т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Владимир: Изд–во ВлГУ, 2022. 88 с. ISBN 978–5–9984–1348–3.
9. Остапенко Т.П., Молодженова В.Н.

Формирование показателей материалоемкости продукции машиностроения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2005. № 10. С. 77–80. EDN HSFOLT.

10. **Базров Б.М., Троицкий А.А.** Анализ метода оценки технологичности конструкции изделия как предмета производства // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № 4 (241). С. 39–43.

11. **Жадик Н.П., Цыблиенко Н.В., Посевин И.Ю.** Материалоемкость и энергоёмкость объектов труда в технологической подготовке // Технологическое образование: достижения, инновации, перспективы: Межвузовский сборник статей XII междунар. науч.–практ. конф.: в 2 т., Тула, 15–18 февраля 2011 г. С. 82–86. EDN UDSOLD.

12. **Агафонцев А.С., Вовк Н.Н., Клевнов Ю.В. и др.** Эффективность использования аддитивных технологий как альтернативы традиционным субтрактивным технологиям при изготовлении сложных деталей из металла // Труды РФИЦ–ВНИИЭФ. 2017. № 22-2. С. 228–231. EDN LVQBCC.

13. **Абрамов И.В.** Проблемы и перспективы цифровизации промышленных предприятий с использованием аддитивных технологий // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 2. EDN CEXVOS.

14. **Алабугин А.А., Топузов Н.К.** Как построить инновационно–ориентированную систему ресурсосберегающего развития предприятия? // Управление персоналом. 2009. № 14. С. 33–40. EDN KZIAHJ.

15. **Витязь П.А., Хейфец М.Л., Чижик С.А.** «Индустрия 4.0»: от информационно–коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико–технических наук. 2017. № 2. С. 54–72. EDN YUGXFV.

16. **Технологичность** конструкции изделий машиностроения: учебное пособие / А.П. Бабичев, В.И. Безжон, М.Е. Попов, А.М. Попов, А.Г. Хведелидзе, Н.О. Шевченко. Ростов–на–Дону, 2014. 124 с.

17. **Государственная** программа «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» [Электронный ресурс] / Правительство РФ: офиц. сайт. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/862/events/> (дата обращения: 14.09.2023).

18. **Материалы** и процессы аддитивных технологий (быстрое прототипирование) /

В.А. Дьяченко, И.Б. Челпанов, С.О. Никифоров, Д.Д. Хозонхонова. Улан–Удэ: Изд–во БНЦ СО РАН, 2015. 198 с.

19. **Оценка** количественных показателей производственной технологичности деталей / П.Ю. Бочкарев, Л.Г. Бокова. Саратов: Саратовский гос. техн. ун–т, 2015. 110 с.

20. **Скворцова Д.А.** Разработка дополнительных коэффициентов для оценки технологичности серийной сборки наукоемких многокомпонентных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 6. С. 3–7.

REFERENCES

1. GOST 14.205–83. Manufacturability of the product design. Introduced on 1983-04-01. Moscow: Publishing House of Standards, 1983. 11 p.

2. Additive technologies in mechanical engineering: a textbook / M.A. Zlenko, A.A. Popovich, I.N. Mutylyna. Saint Petersburg, 2013. 222 p.

3. Meng Y., Zhang Y. Design for additive manufacturing: A review of case studies // Assembly Automation. 2014. Vol. 34, no. 4. P. 274–283. doi: 10.1108/AA-04-2014-047.

4. Guvendiren M., Molde J., Soares R.M.D., Kunkel E., Smith B., Padilla P. Impact of design and process parameters on mechanical properties of 3D printed parts // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 38. 101804

5. Kheifetz M.L. From Information and Additive Technologies to Self-Reproduction of Machines and Organisms // Advanced Materials and Technologies. 2018. No. 1. P. 22–35. DOI 10.17277/amt.2018.01. pp. 022–035. EDN XWDLAD

6. Gibson, Ya., Rosen, D., Stocker, B. Additive manufacturing technologies. Three-dimensional printing, rapid prototyping and direct digital production. Moscow: TECHNOSPHERE, 2016. 656 p. ISBN 978-5-94836-447-6

7. Tomlin M., Meyer J. Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part. In Proceedings of the Proceeding of the 7th Altair CAE technology conference; 2011; pp. 1–9.

8. Additive technologies [Electronic resource]: practicum / L.V. Belyaev, A.V. Zhdanov Sort; Vladimir State University named after A.G. N. G.G. Stoletov. Vladimir: publ.house–VISU, 2022. p. 88. ISBN 978– 5-9984-1348-3.

9. Ostapenko T.P., Molodozhenova V.N. Formation of indicators of material consumption of

machine-building products // News of higher educational institutions. Mechanical engineering, 2005, no. 10, pp. 77–80. EDN HSFOLT

10. Bazrov B.M., Troitskiy A.A. Assessment production manufacturability of the design in the product life cycle. Handbook. An engineering magazine with a supplement, 2017, no. 4 (241). pp. 39–43.

11. Zhadik N.P., Tsyblyienko N.V., Posevin I.Yu. Material and energy consumption of labor objects in technological training // Techno–economic education: achievements, innovations, prospects: Interuniversity collection of articles of the XII International Scientific and Practical Conference: in 2 volumes, Tula, February 15–18, 2011. Pp. 82–86. EDN UDSOLD.

12. Agafontsev A.S., Vovk N.N., Klevtsov Yu.V. et al. The effectiveness of using additive technologies as an alternative to traditional subtractive technologies in the manufacture of complex metal parts // Proceedings of the RFNC–VNIIEF, 2017, no. 22-2. pp. 228–231. EDN LVQBCC.

13. Abramov I.V. Problems and prospects of digitalization of industrial enterprises using additive technologies // Bulletin of Eurasian Science. 2023, vol. 15, no. 2. EDN CEXVOS.

14. Alabugin A.A., Topuzov N.K. How to build an innovation-oriented system of resource-saving enterprise development? // Personnel management. 2009, no. 14, pp. 33–40. EDN KZIAHJ.

15. Vityaz P.A., Kheifets M.L., Chizhik S.A. «Industry 4.0»: from information and communication

and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. A physical and technical sciences issue. 2017, no. 2, pp. 54–72. EDN YUGXFV.

16. Manufacturability of Engineering Product Design: a textbook / A.P. Babichev, V.I. Bezjon, M.E. Popov, A.M. Popov, A.G. Khvedelidze, N.O. Shevchenko. Rostov–on–Don, 2014, 124 p.

17. The state program «Development of industry and increasing its competitiveness» [Electronic resource] / Government of the Russian Federation: official. website. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/862/events/> (date of access: 09/14/2023).

18. Materials and processes of additive technologies (rapid prototyping) / V. A. Dyachenko, I. B. Chelpanov, S.O. Nikiforov, D.D. Khozonkhonova. Ulan–Ude: Publishing House of the BSC SB RAS, 2015, 198 p.

19. Evaluation of quantitative indicators of the production adaptability of parts / P.Y. Bochkarev, L.G. Bokova. Saratov: Saratov State Technical University, 2015, 110 p.

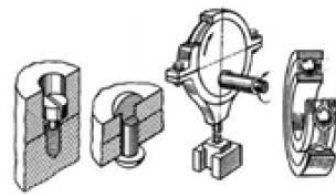
20. Skvortsova D.A. Development of additional coefficients for assessing the manufacturability of serial assembly of high-tech multicomponent products // Assembling in mechanical engineering, instrument-making. 2015, no. 6, pp. 3–7

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

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

Статья поступила в редакцию 05.12.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.01.2025.

The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 23.12.2024; assepted for publication 26.01.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №3 (165). С.19-28.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №3 (165). P.19-28.

Научная статья

УДК 534-8+621.813+62-771

doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-19-28

Анализ влияния факторов температуры, массы и амплитуды колебаний на сборку резьбового соединения с помощью ультразвука

Александр Вадимович Сухов¹, аспирант

Дмитрий Сергеевич Фатюхин², д.т.н.

^{1, 2} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

¹ sukhov-aleksandr96@mail.ru / <https://orcid.org/0009-0009-9097-8216>

² mitriy2@yandex.ru / <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

Аннотация. Проанализирован ряд работ, посвященных ультразвуковой сборке и разборке, а также выявлены их недостатки, в частности слабое внимание к вопросу многофакторного влияния на процессы сборки с применением ультразвука. На основе анализа источников определены факторы, способные значительно влиять на процесс сборки резьбовых соединений, которыми являются температура, масса собираемого соединения, а также амплитуда колебаний. Рассмотрено влияние на сборку указанных факторов в отдельности, а также их одновременное воздействие на процесс сборки с применением ультразвука. Результаты показали, что увеличение массы собираемого резьбового соединения увеличивает эффективность применения ультразвука. Также результаты показали, что увеличение или уменьшение температуры практически не оказывает влияния на эффективность сборки, что подтверждается статистической обработкой, которая показывает малую связь между откликом и фактором. При этом применение ультразвука в зависимости от температуры влияет на разброс полученных значений в рамках одной точки – полученные значения варьируются в диапазоне 5 % при средних значениях температуры и в диапазоне 10 % при граничных значениях. Результаты многофакторного эксперимента подтвердили характер влияния амплитуды колебаний, массы и температуры собираемого соединения, выявив значимость факторов амплитуды и массы, при этом фактором температуры можно пренебречь ввиду его малого влияния. Обработка результатов многофакторного эксперимента велась двумя различными методами, в результате чего были получены схожие зависимости, что, в свою очередь, подтверждает высокую достоверность полученных результатов.

Ключевые слова: технология, ультразвук, колебания, сборка, резьбовые соединения

Для цитирования: Сухов А.В., Фатюхин Д.С. Анализ влияния факторов температуры, массы и амплитуды колебаний на сборку резьбового соединения с помощью ультразвука // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 3 (165). С. 19–28. doi: 10.30987/2223-4608-2025-19-28

Impact analysis of temperature, mass, and oscillation amplitude on the assembly of a threaded fastening using ultrasound

Alexander V. Sukhov¹, PhD student

Dmitry S. Fatyukhin², D. Eng.

^{1, 2} Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹ sukhov-aleksandr96@mail.ru

² mitriy2@yandex.ru

Abstract. A number of works devoted to ultrasonic assembly and disassembly have been analyzed, and their disadvantages have been identified, in particular, lack of attention to the issue of multifactorial nature of the influence on assembly using ultrasound. Based on the analysis of the sources, the factors that can significantly affect the assembly process of threaded fastenings are determined. They are temperature, mass of the assembled fastening, as well as the amplitude of vibrations. The results showed that increasing the mass of the assembled threaded fastening increases the effectiveness of ultrasound application. The results also showed that increasing or decreasing the temperature has virtually no effect on the assembly efficiency, which is confirmed by statistical processing, which shows a small relationship between the response and the factor. At the same time, the use of ultrasound, depending on the temperature, affects the spread of the obtained values within a single point – the values obtained vary in the range of 5 % at average temperatures and in the range of 10% at boundary values. The results of the multifactorial experiment confirmed the nature of the influence of the oscillation amplitude, mass and temperature of the assembled fastening, revealing the importance of the amplitude and mass factors, while the temperature factor can be neglected due to its minor influence. The results of the multifactorial experiment were processed using two different methods, as a result of which similar dependencies were obtained, which, in turn, confirms the high reliability of the obtained results.

Keywords: technology, ultrasound, vibrations, assembly, threaded fastenings

For citation: Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Impact analysis of temperature, mass, and oscillation amplitude on the assembly of a threaded fastening using ultrasound / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 19–28. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-19-28

Введение

К изделиям машиностроения предъявляются жесткие требования к качеству изделий и их надёжности. Особое внимание уделяется к изделиям транспортного машиностроения, которые работают в различных условиях эксплуатации, в том числе экстремальных.

Такие показатели надёжности, как работоспособность, безотказность, ремонтпригодность, обеспечиваются в значительной степени качеством сборки изделий. Наиболее распространённым видом разборных соединений является резьбовое, позволяющее проводить сборку и разборку изделий без их повреждения, создавать требуемые прочность и жесткость соединения, обеспечивать долговечность и сохраняемость конструкции, а также её ремонтпригодность. Резьбовые соединения размеров М8...М24 составляют порядка 70 % всех соединений автомобиля, на которые приходится 25...30 % трудоёмкости сборки и 25...64 % трудоёмкости разборочных работ. По разным оценкам, до 15...20 % отказов техники в процессе эксплуатации связано с резьбовыми соединениями. Основными причинами нарушения эксплуатационных характеристик резьбовых соединений являются самоотвинчивание соединений и уменьшение осевой силы вследствие действий знакопеременных и вибрационных нагрузок. Перечисленные причины могут приводить не только к отказам отдельных сборочных единиц и агрегатов, но и конструкций и изделий в целом.

Вопросам, связанным с повышением надёжности резьбовых соединений при сборке посвящено большое число работ [1 – 3]. Значительное их количество направлено на разработку конструктивных изменений деталей соединений или на создание технологий, основанных на использовании клеев и герметиков, что увеличивает трудоёмкость и стоимость как проектирования, так и изготовления соединения [4, 5]. Кроме того, перечисленные способы создают значительные трудности при разборке резьбовых соединений. Наиболее важными факторами, определяющими надёжность резьбового соединения как при сборке, так и при разборке, являются деформация элементов соединения и равномерность распределения нагрузки на витках резьбы, которые в основном зависят от характера трения [6, 7]. Перспективным направлением повышения надёжности резьбовых соединений является применение ультразвуковых колебаний, которое позволяет уменьшить трение при сборке и разборке, а также не требует увеличения трудоёмкости изготовления элементов соединения и дополнительных материалов.

Пути совершенствования сборки и разборки резьбовых соединений с применением ультразвука являются: выявление и оптимизация таких значимых технологических характеристик, как типоразмер и расположение соединения, амплитуда колебаний излучателя; выбор эффективного вида колебаний (продольных, продольно-крутильных, сдвиговых); создание рациональных технологических

решений, обеспечивающих повышение качества резьбовых соединений; разработка и создание цифровых продуктов, позволяющих выбирать и поддерживать оптимальные технологические режимы.

Влиянию ультразвуковых колебаний на повышение эффективности процессов сборки и разборки различных соединений деталей машин посвящено значительное количество исследований, в частности [8 – 13]. Однако работы по этому вопросу имеют определенные недостатки. В частности, внимание практически не уделяется факторам, влияющим на сборку, за исключением амплитуды колебаний, что не позволяет проводить комплексную оценку эффективности применения ультразвука при сборке резьбовых соединений. Практически не затронуты такие факторы как масса собираемого соединения и его температура, а также совокупное влияние массы соединения, температуры и амплитуды ультразвуковых колебаний. На основании вышеизложенного можно утверждать, что определение степени влияния таких факторов, как температура и масса соединения на сборку с помощью ультразвука является актуальной задачей.

Методика проведения эксперимента

Экспериментальное исследование по определению влияния ультразвука на сборку проводилось следующим образом – после закручивания болтового соединения с помощью динамометрического ключа до нормативного значения и контроля величины момента закручивания $M_{закр}$ включался источник колебаний. После включения колебаний проводилось дозакручивание соединения до нормативного значения $M_{закр}$ вследствие снижения $M_{закр}$ при наложении ультразвуковых колебаний

Исследования проводились на комплексе ультразвукового оборудования, включающем в себя генератор ГЗ-33, возбуждающий электрические колебания ультразвуковой частоты, генератор УЗГ5-1.6/22, усиливающий мощность сигнала, и магнитострикционную колебательную систему (рис. 1). Частота обработки составляла 22 кГц, тип колебаний – сдвиговые.

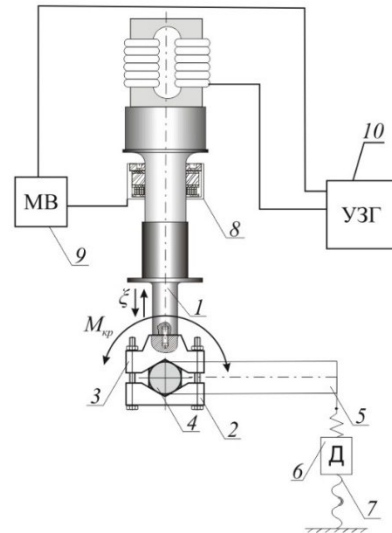


Рис. 1. Схема проведения эксперимента по определению влияния сдвиговых колебаний на процесс сборки:

1 – рабочий инструмент ультразвуковой колебательной системы; 2, 3 – скобы; 4 – болт; 5 – ключ; 6 – динамометр; 7 – винтовая передача; 8 – электродинамический датчик; 9 – милливольтметр; 10 – ультразвуковой генератор

Fig. 1. Scheme of an experiment to determine the effect of shear vibrations on the assembly process:

1 – working tool of an ultrasonic oscillatory system;
2, 3 – staples; 4 – bolt; 5 – wrench; 6 – dynamometer;
7 – screw-type gear; 8 – electrodynamic sensor; 9 – milli-
voltmeter; 10 – ultrasonic generator

При исследовании влияния массы на сборку в качестве элементов с наружной резьбой использовались оцинкованные болты М8 с крупным шагом, нормальной точности, класс прочности 5.8, в качестве элемента с внутренней резьбой использовалась гайка М8. Масса соединения составляла 15, 20, 25, 30 и 35 г. Амплитуда колебаний составляла 8 мкм. Момент закручивания соединения $M_{\text{закр}}$ обеспечивался динамометрическим ключом и контролировался с помощью динамометра и составил 24,5 Н·м.

Для определения влияния температуры собираемого соединения были проведены исследования по сборке с помощью ультразвука соединения M12 длиной 50 мм в диапазоне температур -15...80 °С. Амплитуда колебаний составляла 4 мкм. Такое значение амплитуды позволяет достигать высокой эффективности сборки, при этом не происходит тепловых потерь, влияющих на результаты. Вследствие этого повышается достоверность получаемых значений.

Для определения влияния на собираемое соединение амплитуды колебаний, массы и температуры были проведены исследования по сборке с помощью ультразвука типоразмера М8. Диапазоны значений факторов приведены в табл. 1.

Результаты экспериментов обрабатывались в программе Statistika. Для однофакторных экспериментов оценивалась достоверность полученной модели путем сравнения критериев достоверности для семи различных моделей [14, 15]. Оценка проводилась по совокупности таких показателей, как коэффициент детерминации R^2 , коэффициент корреляции R , F -статистика, уровень значимости p , стандартная ошибка оценки ϵ .

Результаты исследования

Результаты исследования влияния ультразвука на сборку соединения одного типоразмера с различной массой в виде диаграммы рассеяния зависимости относительного момента откручивания от массы соединения при подгонке методом наименьших квадратов представлены на рис. 2.

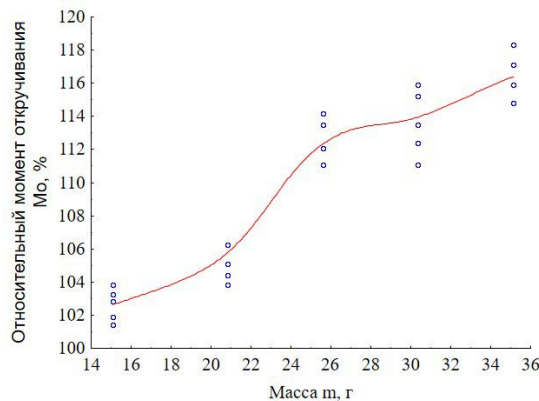


Рис. 2. Зависимость относительного момента откручивания M_0 от массы соединения для типоразмера М8 с подгонкой методом наименьших квадратов

Fig. 2. Dependence of the relative torque of unscrewing the M_0 on the mass of the joint for the standard size M8 with least-squares deviation method adjustment

По результатам анализа можно определить наиболее точный вид модели и коэффициенты для этой модели. Наиболее достоверной является модель полинома первой степени, описанная формулой:

$$Y = 91,78 + 0,72X, \quad (1)$$

В данном случае коэффициент детерминации $R^2 = 0,88$; коэффициент корреляции $R = 0,94$; значение F -статистики = 168,88 при уровне значимости $p < 0,00000$; значение стандартной ошибки оценки = 1,96. Учитывая вышеизложенное, гипотеза о нулевых значениях коэффициентов регрессии отклоняется. Несмотря на то, что у других моделей значения R^2 и R равны или немного больше, по совокупности факторов полином первой степени является наиболее достоверной моделью.

Окончательный вид модели зависимости относительного момента откручивания от амплитуды колебаний для типоразмера М8 при крутильных колебаниях выглядит как

$$M_0 = 91,78 + 0,72m \pm 1,42\epsilon, \quad (2)$$

где m – масса резьбового соединения, г.

Обработка результатов показала, что зависимость является линейной. Это объясняется ступенчатым изменением длины болтов, что в свою очередь обуславливает плавный рост массы соединения, который является линейным.

Результаты определения влияния температуры соединения на сборку в виде диаграммы рассеяния зависимости относительного момента откручивания от температуры соединения при подгонке методом наименьших квадратов представлены на рис. 3.

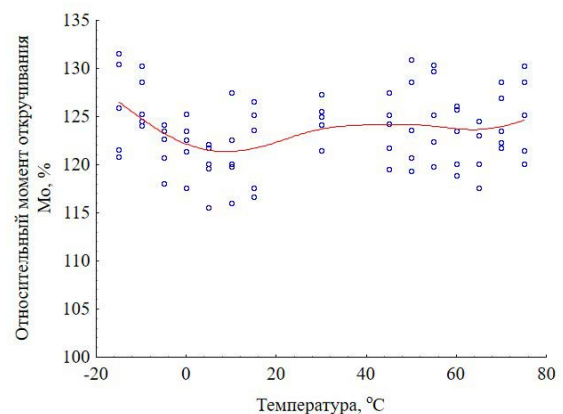


Рис. 3. Зависимость относительного момента откручивания от температуры соединения для типоразмера М12 с подгонкой методом наименьших квадратов

Fig. 3. Dependence of the relative torque of unscrewing on the fastening temperature for the standard size M12 with least-squares deviation method adjustment

По результатам анализа можно определить наиболее точный вид модели и коэффициенты для этой модели. В результате наиболее достоверной является модель полинома третьей степени, показанная в формуле:

$$Y = 122,35 - 0,1409X + 0,0064X^2 - 0,0001X^3, \quad (3)$$

В данном случае коэффициент детерминации $R^2 = 0,11$; коэффициент корреляции $R = 0,33$ для остальных моделей значения R^2 и R меньше указанных. Значение F -статистики = 2,98 при уровне значимости $p < 0,03722$; значение стандартной ошибки оценки = 3,6910. Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что связь между фактором и откликом является слабой и практически не значимой, из чего можно сделать вывод, что на величину M_0 температура соединения не оказывает заметного влияния.

Это также видно на рис. 2. В диапазоне температур $-20 \dots 80$ °C усредненные значения M_0 варьируются на $4 \dots 5$ %. Однако необходимо отметить, что наложение колебаний влияет на такой аспект, как большой разброс значений M_0 . Так, при граничных значениях (-20 и 75 °C) диапазон составляет порядка 10 %, однако при достижении температуры 30 °C разброс снижается до $5 \dots 6$ %.

Многофакторный эксперимент по определению влияния амплитуды, массы и температуры соединения на сборку был проведен с использованием некомпозиционного плана Бокса-Бенкина второго порядка для трех факторов, с числом опытов $N = 12$ и числом опытов на нулевом уровне факторов $n_0 = 3$. Кодированные значения факторов и соответствующие им физические значения факторов приведены в табл. 1. В качестве параметра оптимизации был выбран M_0 .

1. Кодированные значения факторов

1. Coded values of the factors

Фактор	Обозначение	Уровни варьирования факторов		
		верхний	нулевой	нижний
		Кодированное обозначение		
		+1	0	-1
Амплитуда, мкм	x_1	8	4	0
Масса, г	x_3	35	25	15
Температура, °C	x_2	+70	25	-20

Кодирование уровней факторов проводилось по формуле:

$$x_i = \frac{\bar{x}_i - 0,5(\bar{x}_{i\max} - \bar{x}_{i\min})}{0,5(\bar{x}_{i\max} - \bar{x}_{i\min})} \quad (4)$$

где x_i – кодированный уровень i -го фактора;
 $\bar{x}_i$ – текущее значение i -го фактора;
 $\bar{x}_{i\max}$ – максимальное значение i -го

фактора; $\bar{x}_{i\min}$ – минимальное значение i -го фактора. Полученная модель имеет вид квадратичного полинома:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (5)$$

Следует отметить, что, поскольку переменные в данной модели закодированы, коэффициенты $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} \dots$ являются оценками истинных коэффициентов [16]. При этом перевести полученную модель вида (5) в модель, содержащую натуральные факторы, не

рекомендуется, поскольку это резко ухудшает возможность интерпретации модели и принятие по ней технико-экономических решений. Матрица плана и результаты эксперимента приведены в табл. 2.

2. Матрица плана и результаты эксперимента

2. The matrix of the plan and the results of the experiment

№	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y
1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	102,82
2	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	178,9
3	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	103,85
4	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	176,5
5	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	101,76
6	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	171,9
7	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	107,38
8	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	182,51
9	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	139,76
10	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	140,69
11	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	146,79
12	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	145,43
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	141,68
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	137,25
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	143,93
Σ	294	-1,8	28	-3,43	4,99	-2,29	1125,62	1134,74	1136,22	2121,15

Ошибка S_y и дисперсия параметра S_y^2 находятся по результатам трех опытов на нулевом уровне факторов и составляют $S_y = 3,4$ и

$S_y^2 = 11,55$. Значения коэффициентов b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} определяются по соотношениям (6) – (9):

$$b_0 = \frac{1}{n_0} * \sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}, \quad (6)$$

$$b_i = A \sum_{n=1}^N x_{in} y_n, \quad (7)$$

$$b_{ij} = D \sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} y_n, \quad (8)$$

$$b_{ii} = B \sum x_{in}^2 y_n + C \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^N x_{in}^2 y_n - \frac{\sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}}{n_0 p}, \quad (9)$$

где k – число факторов; y_{0n} – значение параметра оптимизации на нулевом уровне факторов; y_n – значение параметра оптимизации в n -й строке матрицы; x_i – кодированные уровни факторов; $A = 0,125$; $B = 0,25$; $C = 0,0625$; $D = 0,25$; $p = 2$.

Значимость коэффициентов определяется по формуле:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{bi}; \quad (10)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента при уровне доверия $\alpha = 0,05$; S_{bi} – ошибка определения коэффициентов b_i ,

определяемая как $S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2}$, где S_{bi}^2 – дисперсия при определении коэффициентов.

Дисперсии коэффициентов определяются как:

$$S_{bi}^2 = AS_y^2, \quad (11)$$

$$S_{bij}^2 = DS_y^2, \quad (12)$$

$$S_{bii}^2 = (B + \frac{1}{p^2 n_0}) S_y^2. \quad (13)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3

3. Значения коэффициентов расчетной математической модели

3. The values of the coefficients of the calculated mathematical model

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
b_0	140,95	b_{11}	-0,43	S_{bij}	1,70
b_1	36,75	b_{22}	1,6	S_{bii}	1,96
b_2	-0,23	b_{33}	-0,14	ΔS_{b0}	7,24
b_3	3,50	S_{bi}^2	1,44	ΔS_{bi}	2,56
b_{12}	-0,86	S_{bij}^2	2,89	ΔS_{bij}	3,62
b_{13}	1,25	S_{bii}^2	3,85	ΔS_{bii}	4,18
b_{23}	-0,57	S_{bi}	1,20		

Расчеты показывают, что значимыми являются коэффициенты b_0, b_1, b_3 , в связи с чем итоговая зависимость имеет следующий вид (14):

$$y = 140,95 + 36,75x_1 + 3,50x_3, \quad (14)$$

Проверка адекватности полученного уравнения проводится по критерию Фишера $F = S_{ад}^2 / S_y^2$. $S_{ад}$ – дисперсия адекватности, которая определяется как (15):

$$S_{ад} = \frac{SS_{ост} - SS_y}{N - m - (n_0 - 1)}, \quad (15)$$

где m – число значимых коэффициентов;

$$SS_{ост} = \sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - y_n)^2;$$

$$SS_y = \sum_{n=1}^{n_0} (y_{0n} - \bar{y}_0)^2;$$

$\bar{y}_0$ – среднее значение параметра оптимизации трех опытов на нулевом уровне факторов; $(\hat{y}_n - y_n)$ – разность между расчетным значением и опытным значением.

В данном случае $SS_y = 23,1$, $SS_{ост} = 58,47$. Следовательно, $F = 10,34/11,55 < 1$, т. е. уравнение адекватно при всех уровнях доверия α .

Анализ уравнения показывает, что наибольшее влияние на M_0 оказывает x_1 , (амплитуда колебаний), x_3 (масса соединения) влияет незначительно, а x_2 (температура соединения) не влияет вообще. Кроме того, можно говорить об отсутствии корреляции между факторами. Таким образом, чем больше амплитуда колебаний и масса соединения – тем больше эффективность применения ультразвука на

этапе сборки соединения в сравнении с традиционным методом сборки.

Дополнительно в программе Statistica была проведена проверка на предмет взаимосвязи между влияющими факторами, для чего была проанализирована корреляционная матрица (рис. 4). Анализ показал, что корреляция отсутствует полностью и факторы между собой никак не связаны.

N=15

Переменная	X1	X2	X3	Y
X1	1,00	-0,00	-0,00	0,99
X2	-0,00	1,00	0,00	-0,01
X3	-0,00	0,00	1,00	0,09
Y	0,99	-0,01	0,09	1,00

Рис. 4. Корреляционная матрица параметров

Fig. 4. The correlation matrix of the parameters

Также с целью проверки полученных результатов расчетным методом в программе Statistica была получена математическая модель методом факторного анализа без поворота осей. Данный метод был выбран, поскольку даже при числе главных компонент, равном трем, доля общей дисперсии, обработанной тремя факторами, составляет 99,9 % (рис. 5)

Перемен.	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
X1	0,579524	0,000000	0,814955
X2	0,814955	0,000000	-0,579524
X3	0,000000	1,000000	0,000000
Общ. дис.	1,000000	1,000000	1,000000
Доля общ.	0,333333	0,333333	0,333333

Рис. 5. Факторы нагрузки методом анализа без поворота осей

Fig. 5. Load factors using the analysis method without rotation of axes

Отсюда связь между главными компонентами и нормализованными факторами представляется в виде:

$$F_1 = 0,579524X_1 + 0,814955X_2; \quad (16)$$

$$F_2 = X_3; \quad (17)$$

$$F_3 = 0,814955X_1 - 0,579524X_2; \quad (18)$$

С помощью инструмента «множественная регрессия» были определены основные параметры искомой модели (рис. 6):

R= ,99749029 R2= ,99498688 Скоррект. R2= ,99361966
F(3,11)=727,75 p<,000000 Станд. ошибка оценки: 2,2347

N=15	БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	В	Ст.Ош. В	t(11)	p-знач.
Св.член			141,4100	0,576999	245,0786	0,000000
Ф1	0,570500	0,021348	15,9608	0,597250	26,7238	0,000000
Ф2	0,094569	0,021348	2,6458	0,597250	4,4299	0,001012
Ф3	0,812756	0,021348	22,7383	0,597250	38,0717	0,000000

Рис. 6. Основные параметры модели, основанной на независимых факторах

Fig. 6. The main parameters of the model based on independent factors

Модель, основанная на независимых факторах, имеет вид (19):

$$Y = 141,41 + 15,9608F_1 + 2,6458F_2 + 22,7383F_3 \quad (19)$$

После подстановки на место независимых факторов нормализованных физических факторов получаем модель вида:

$$Y = 141,41 + 27,78X_1 - 0,17X_2 + 2,65X_3 \quad (20)$$

Анализ с использованием программы Statistica показал результаты, схожие с результатами, полученными первым методом, за исключением наличия минимального отрицательного влияния температуры. Факт такого расхождения косвенно подтверждается пограничным коэффициентом корреляции для зависимости M_0 от температуры. Также подтверждается отсутствие корреляции между факторами. Таким образом можно утверждать, что влияющими факторами являются амплитуда и масса, и чем больше амплитуда колебаний и масса соединения – тем больше эффективность применения ультразвука на этапе сборки соединения в сравнении с традиционным методом сборки.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показали, что факторы температуры и массы собираемого резьбового соединения при сборке с ультразвуком влияют на процесс сборки по-разному, в частности:

– увеличение массы собираемого резьбового соединения увеличивает эффективность применения ультразвука. Так, при увеличении массы в 2 раза (с 15 до 30 г) создаваемое осевое усилие увеличивается на 10 %, при этом наблюдается линейная зависимость увеличения эффективности в зависимости от увеличения массы.

– увеличение или уменьшение температуры практически не оказывает влияния на эффективность сборки, что подтверждается статистической обработкой, которая показывает малую связь между откликом и фактором. При этом применение ультразвука в зависимости от температуры влияет на разброс полученных значений в рамках одной точки – полученные значения варьируются в диапазоне 5 % при 30 °C и в диапазоне 10 % при граничных значениях (-20 и 75 °C).

Результаты многофакторного эксперимента подтвердили характер влияния амплитуды колебаний, массы и температуры собираемого соединения, выявив значимость

факторов амплитуды и массы, при этом фактором температуры можно пренебречь ввиду его малого влияния.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Хажметов Л.М. и др. Повышение эксплуатационной надежности сельскохозяйственных машин // Техника и оборудование для села. 2023. № 4 (310). С. 12–16. DOI 10.33267/2072-9642-2023-4-12-16. – EDN HHJDDY.

2. Липка В.М., Копп В.Я., Рапакский Ю.Л. Исследование возможности повышения надежности резьбовых соединений, получаемых автоматизированной сборкой, на основе рационального выбора параметров резбонакатывания // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: материалы международной научно-технической конференции, Севастополь, 07–11 сентября 2015 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2015. С. 46–49. EDN VXSNTZ.

3. Рапакский Ю.Л., Липка В.М., Хаустович А.Г. Повышение качества автоматизированной сборки резьбовых соединений на основе системы активного контроля параметров затяжки // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: материалы международной научно-технической конференции, Севастополь, 05–09 сентября 2016 года / Севастопольский государственный университет; науч. ред. В.Я. Копп. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2016. С. 35–36. EDN WPWHQR.

4. Белевский Л.С., Ефимова Ю.Ю., Дема Р.Р. и др. Испытания резьбовых покрытий муфт насосно-компрессорных труб на муфтонаверточной машине // Тяжелое машиностроение. 2021. № 7-8. С. 39–44. EDN FYKKTf.

5. Винников Д.А., Ягопольский А.Г., Комкова Т.Ю. Фиксация резьбовых соединений в конструкции распорки-гасителя // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 4. С. 5–9. EDN XNRBTN.

6. Иванов А.С., Муркин С.В., Новиков Е.С. Влияние контргайки на распределение нагрузки по виткам резьбы винта затянутого резьбового соединения // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103, № 3. С. 189–192. DOI 10.36652/0042-4633-2024-103-3-189-192. EDN NIBTZM.

7. Прокофьев А.Н. Технологическое обеспечение и повышение качества резьбовых соединений: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Прокофьев Александр Николаевич. Брянск, 2008. 34 с. EDN NJIWRZ.

8. Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Сухов А.В., Фатюхин Д.С. Особенности сборки резьбовых соединений различных размеров при использовании сдвиговых ультразвуковых колебаний // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2021. № 12 (126). С. 26–30. DOI 10.30987/2223-4608-2021-12-26-30. EDN SLAKSG.

9. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Sukhov A.V. et al. Improvement of Threaded-Joint Assembly Using Ultrasound // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41, No. 6. P. 567–569. DOI 10.3103/S1068798X21060150. – EDN AHAISB.

10. Nechai A.A., Nigmatzyanov R.N., Sundukov S.K. et al. Assembly of Threaded Joints in the Presence of Shear Ultrasound // Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42, No. 2. P. 169–171. DOI 10.3103/S1068798X22020174. EDN LEXJUE.

11. Нечай А.А., Нигметзянов Р.Н., Сундуков С.К. и др. Сборка резьбовых соединений под воздействием сдвиговых ультразвуковых колебаний // СТИН. 2021. № 12. С. 16–19. EDN EOHUYR.

12. Вишневская А.Н. Повышение производительности и качества ультразвуковой сборки резьбовых соединений // Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы: Материалы международной научной конференции, Уфа, 25–29 сентября 2017 года / Ответственный редактор А.А. Назаров. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2017. С. 24–26. EDN YRBVOS.

13. Шуваев В.Г., Шуваев И.В. Повышение надежности резьбовых соединений применением ультразвуковой сборки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4-2. С. 394–398. EDN XAZQBT.

14. Использование модулей программы STATISTICA и расчетных моделей для решения научных задач в области технической эксплуатации автомобилей: учебное пособие для студентов, магистрантов и аспирантов учреждений высшего образования / А.П. Болдин, В.Н. Богумил. М.: Техполиграфцентр, 2016. 154 с.

15. Основы научных исследований: учебник для студ. Учреждений высш. проф. образования / А.П. Болдин, В.А. Максимов. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 336 с.

16. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Статистика, 1981. 264 с.

REFERENCES

1. Apazhev A.K., Shekikhachev Yu.A., Khazhmetov L.M., et al. Improving the operational reliability of agricultural machinery // Machinery and equipment for rural areas. 2023, no. 4 (310), pp. 12–16. DOI 10.33267/2072-9642-2023-4-12-16. EDN HHJDDY.

2. Lipka V.M., Kopp V.Ya., Rapatsky Yu.L. Investigation of the possibility of preventing the sudden destruction of threaded connections containing parts with external threads is demonstrated by the optimal choice of the parameters of the thread-rolling process. // Automation: problems, ideas, solutions: proceedings of the international scientific and technical conference, Sevastopol, September 07-11, 2015. Sevastopol: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University», 2015. pp. 46-49. EDN VXSNTZ.

3. Rapatsky Yu.L., Lipka V.M., Khaustovich A.G. Improving the quality of automated assembly of threaded connections based on a system of active control of tightening

parameters // Automation and instrumentation: problems, solutions : materials of the international scientific and technical conference, Sevastopol, 05-09 September 2016 / Sevastopol State University; scientific ed. by V.Ya. Kopp. – Sevastopol: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University», 2016. pp. 35–36. EDN WPHQR.

4. Belevsky L.S., Efimova Yu.Y., Dema R.R., et al. Tests of threaded coatings of tubing couplings on a coupling winding machine. // Heavy engineering. 2021, no. 7-8. pp. 39–44. EDN FYKKTf.

5. Vinnikov D.A., Yagopolsky A.G., Komkova T.Y. Fixation of threaded connections in construction of spacer damper // Repair. Rebuild. Modernization. 2018, no. 4, pp. 5–9. EDN XNRBTN.

6. Ivanov A.S., Murkin S.V., Novikov E.S. Effect of a locknut on load distribution along the threads of the screw of a tightened threaded connection // Bulletin of Mechanical Engineering. 2024, vol. 103, no. 3, pp. 189–192. DOI 10.36652/0042-4633-2024-103-3-189-192. EDN NIBTzM.

7. Prokofiev A.N. Technological support and quality improvement of threaded connections: specialty 05.02.08 «Technology of mechanical engineering»: thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences / Prokofiev Alexander Nikolaevich. Bryansk, 2008. 34 p. EDN NJIWRZ.

8. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Sukhov A.V., Fatyukhin D.S. Assembly features of threaded fastenings having various sizes when using shear ultrasonic vibrations // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2021, no. 12 (126), pp. 26–30. DOI 10.30987/2223-4608-2021-12-26-30. EDN SLAKSG.

9. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Sukhov A.V. et al. Improvement of Threaded-Joint Assembly Using Ultrasound // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41,

No. 6. P. 567–569. DOI 10.3103/S1068798X21060150. – EDN AHAISB.

10. Nechai A.A., Nigmatzyanov R.N., Sundukov S.K. et al. Assembly of Threaded Joints in the Presence of Shear Ultrasound // Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42, No. 2. P. 169–171. DOI 10.3103/S1068798X22020174. EDN LEXJUE.

11. Nechai A.A., Nigmatzyanov R.N., Sundukov S.K., et al. Assembly of threaded joints in the presence of shear ultrasound // STIN. 2021, no 12, pp. 16-19. EDN EOHUYR.

12. Vishnevskaya A.N. Improving the productivity and quality of ultrasonic assembly of threaded connections // Ultrasound: problems, developments, prospects: Proceedings of the international scientific conference, Ufa, September 25-29, 2017 / The responsible editor is A.A. Nazarov. Ufa: Bashkir State University, 2017, pp. 24–26. EDN YRBVOS.

13. Shuvaev V.G., Shuvaev I.V. Improving the reliability of threaded connections using ultrasonic assembly // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016, vol. 18, no. 4-2, pp. 394–398. EDN XAZQBT

14. Use of modules of the STATISTICA program and computational models for solving scientific problems in the field of technical operation of automobiles: a textbook for students, undergraduates and postgraduates of institutions of higher education / A.P. Boldin, V.N. Bogumil. Moscow: Technopoligrftsentr, 2016, 154 p.

15. Fundamentals of scientific research: a textbook for students. Institutions of higher Prof. education / A.P. Boldin, V.A. Maksimov. Moscow: Publishing Center «Academy», 2012, 336 p.

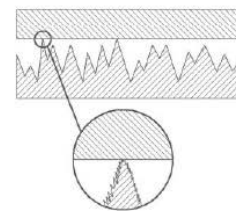
16. Voznesensky V. A. Statistical methods of experiment planning in technical and economic research. Moscow: Statistik Publ, 1981, 264

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

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

Статья поступила в редакцию 26.12.2024; одобрена после рецензирования 22.01.2025; принята к публикации 30.01.2025.

The article was submitted 26.12.2024; approved after reviewing 22.01.2025; assepted for publication 30.01.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 3 (165). С. 29-37.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 29-37.

Научная статья
УДК 621.01.896
doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-29-37

Оценка коэффициента трения и нагрузочной способности модифицированной конструкции радиального подшипника в турбулентном режиме трения

Екатерина Александровна Болгова¹, аспирант
Мурман Александрович Мукутадзе², д.т.н.
Павел Викторович Харламов³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹ bolgova_katya6@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0737-1846>

² murman1963@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2910-3047>

³ pvharlamov@rgups.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5100-4894>

Аннотация. Исследовано влияние истинно-вязкого смазочного материала в радиальном подшипнике скольжения, оборудованного полимерным покрытием и специализированной канавкой на поверхности вала. Разработанная расчетная модель, основанная на уравнениях движения жидкости и уравнении неразрывности, позволяет глубже понять динамику смазочного слоя и его взаимодействие с рабочими поверхностями. Особое внимание уделяется геометрическим особенностям канавки, которые влияют на распределение давления внутри подшипника. Комплексное использование полимерного покрытия и канавки обеспечивает равномерное распределение нагрузок, что повышает нагрузочную способность системы. Численные расчеты показывают, что применение полимерного покрытия снижает коэффициент трения и способствует эффективной работе смазочного материала в условиях турбулентного режима. Экспериментальная валидация модели проводилась при различных условиях нагрузки и скоростей вращения, что позволило достоверно сопоставить теоретические расчеты с экспериментальными результатами. Анализ показал высокую степень согласия между расчетами и экспериментом, подтверждая надежность предложенной модели. Полученные результаты подчеркивают значимость конструктивных решений, таких как сочетание полимерных покрытий и канавок, для повышения эксплуатационных характеристик подшипников.

Ключевые слова: радиальный подшипник, оценка износостойкости, антифрикционное полимерное покрытие, канавка, гидродинамический режим, верификация

Для цитирования: Болгова Е.А., Мукутадзе М.А., Харламов П.В. Оценка коэффициента трения и нагрузочной способности модифицированной конструкции радиального подшипника в турбулентном режиме трения // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 3 (165). С. 29–37. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-29-37

Estimated friction and load capacity coefficients for a modified radial bearing design under a turbulent condition friction

Ekaterina A. Bolgova¹, PhD student
Murmman A. Mukutadze², D. Eng.
Pavel V. Kharlamov³, D.Eng.

^{1, 2, 3} Rostov State University of Railway Transport, Rostov-on-Don, Russia

¹ bolgova_katya6@mail.ru

² murman1963@yandex.ru

³ pvharlamov@rgups.ru

Abstract. The effect of a true viscous lubricant in a radial sliding bearing coated by polymer having a specialized groove on the shaft surface is studied. The developed computational model based on the equations of fluid motion and the equation of continuity allows for a deeper understanding of the dynamics of the lubricating layer and its interaction with the working surfaces. Special attention is paid to the geometric features of the groove, which affect the pressure distribution inside the bearing. The integrated use of a polymer coating and a groove ensures uniform load distribution, which increases the load capacity of the system. Numerical calculations show that the use of a polymer coating reduces friction coefficient and contributes to the efficient operation of the lubricant in turbulent conditions. Experimental validation of the model was carried out under various load conditions and rotational speeds, which made it possible to compare theoretical calculations with experimental results in a high-quality way. The analysis showed a high degree of agreement between calculations and experiment, confirming the reliability of the proposed model. The results obtained prove the necessity of design solutions, such as a combination of polymer coatings and grooves for improved bearing performance.

Keywords: radial bearing, wear resistance evaluation, antifriction polymer coating, groove, hydrodynamic mode, verification

For citation: Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Kharlamov P.V. Estimated friction and load capacity coefficients for a modified radial bearing design under a turbulent condition friction / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 29–37. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-29-37

Введение

Исследования, направленные на разработку новых конструкционных материалов для трибоузлов, основываются на многократных экспериментах и теоретических моделях. Важной задачей является нахождение оптимального сочетания материалов, которые способны выдерживать различные виды нагрузок и воздействия внешней среды, а также минимизировать износ и трение. Ученые и инженеры стремятся улучшить механические свойства материалов, увеличивая их твердость, прочность и износостойкость, а также снижая коэффициент трения [1 – 4].

В последние годы методы машинного обучения и искусственного интеллекта стали неотъемлемой частью процесса проектирования и исследования трибосопряжений [5 – 9]. Применение этих инновационных технологий позволяет системно анализировать большие объемы данных, выявлять скрытые закономерности и формировать предсказательные модели с высокой точностью.

Особое внимание уделяется междисциплинарному подходу, объединяющему знания из области материаловедения, механики деформируемого твердого тела, химии и физики поверхностей. Это сотрудничество способствует разработке новых, более эффективных

материалов и покрытий, повышающих срок службы и надежность узлов трения.

Также следует уделить внимание разработке новых рецептов на основе предпочтительных материалов, таких как фторопласты, полиамиды и полиуретаны. Эффективная комбинация этих компонентов может привести к значительному снижению коэффициента трения и, следовательно, к уменьшению износа и повышению ресурсосберегающей эксплуатации оборудования [10 – 13].

Экспериментальные данные [14 – 20] свидетельствуют о том, что переменные величины, такие как концентрация наполнителя и температура отверждения, оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики конечного материала. Авторы отмечают, что дальнейшие исследования металлоплакирования рабочих поверхностей трения «колесо – рельс» могут расширить возможности использования таких покрытий в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» в тяжелонагруженных узлах трения.

Однако важно отметить, что для успешного применения этих материалов в трибосопряжениях технологических машин необходимо учитывать специфические особенности каждой трибосистемы. Игнорирование этих особенностей может привести к недостоверным результатам или снижению эффективности подходов, разработанных в исследованиях.

Таким образом, разработка и улучшение гидродинамических моделей трибосистем оказывают непосредственное влияние на промышленное производство и технику. Более точные модели позволяют создавать более оптимальные конструкции, продлевать срок службы агрегатов. Это, в свою очередь, снижает эксплуатационные издержки, улучшает энергоэффективность и повышает общую надежность машин и механизмов.

Материалы и методы решения

Для оценки износостойкости по коэффициенту трения и нагрузочной способности рассматривается радиальный подшипник модифицированной конструкции. Подразумевается, что течение сжимаемой жидкости турбулентное, при этом скорость вращения втулки равна нулю, а вала Ω [21].

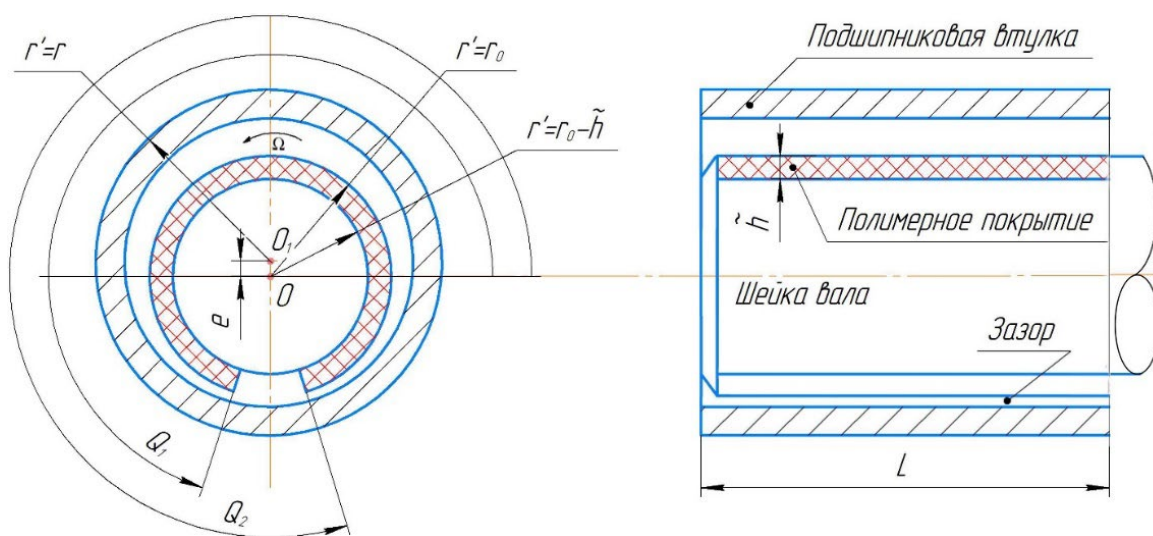


Рис. 1. Расчетная схема трибоконтакта

Fig. 1. Calculation scheme of tribocontact

Координатная система r', θ с полюсом в центре вала уравнения контуров вала с полимерным покрытием, вала с канавкой, подшипниковой втулки запишутся в виде:

$$r' = r_0, \quad r' = r_0 - \tilde{h}, \quad r' = r_1(1 + H), \quad (1)$$

где r_0 – радиус вала; r_1 – радиус подшипниковой втулки; $\tilde{h}$ – высота канавки; H – толщина смазочного слоя.

Зависимость вязкостных характеристик:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p' - \beta' T'} \quad (2)$$

где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала; μ_0 – характерная вязкость смазочного материала; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое; α' и β' – экспериментальные постоянные; T' – параметр температуры.

Для разработки расчетной модели с учетом (2) используем следующие исходные уравнения. Первым уравнением является уравнение, которое описывает турбулентное движение жидкости, в дополнение к этому используем уравнение неразрывности и уравнение состояния:

$$\frac{\partial p'_i}{\partial r'} = 0; \quad j\mu' \frac{\partial^2 v_{\theta i}}{\partial r'^2} = \frac{dp'_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial(\rho' v'_{r'})}{\partial r'} + \frac{\rho' v'_{r'}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial(\rho' v'_{\theta i})}{\partial \theta} = 0,$$

$$p' = \frac{\lambda \Omega r}{2} \rho' \quad (3)$$

где v – вертикальная компонента скорости;
 θ – угловая координата; ρ' – плотность
(безразмерная величина); λ – коэффициент потерь
на трение (определяется экспериментально);

Ω – угловая скорость вала.

Поведение скорости жидкости на
границах:

$$\begin{aligned} v_\theta = 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1(1+H) = h'(\theta); \\ v_{r'} = 0 \quad v_\theta = \Omega r_0 \quad \text{при} \quad r' = r_0; \\ v_{r'} = 0 \quad v_\theta = \Omega(r_0 - \tilde{h}) \quad \text{при} \quad r' = r_0 - \tilde{h}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$p'(0) = p'(\theta) = p_g, \quad r_0 - \tilde{h} = h_0^* \quad \text{при} \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2.$$

Соотношение безразмерных и размерных величин:

$$v_\theta = \Omega v(r_0 - \tilde{h}), \quad v_{r'} = \Omega \delta u, \quad p' = p^* p,$$

$$p^* = \frac{\mu_0 \Omega (r_0 - \tilde{h})^2}{\delta^2}, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p^*},$$

$$r' = (r_0 - \tilde{h}) + \delta r, \quad \delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h}), \quad \rho^* = \frac{2p}{\lambda \Omega r}, \quad \rho' = \rho^* \rho,$$

$$T^* = \frac{\mu \Omega (r - h)}{J \lambda}, \quad \beta = T^* \beta', \quad T' = T^* T. \quad (5)$$

где δ – зазор; p^* – гидродинамическое давление;
 ρ^* – плотность (размерная величина).

Выполняя подстановку (5) в систему
дифференциальных уравнений (3) с учетом
граничных условий (4), получим:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{1}{\Lambda} \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial \theta} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0 - \tilde{h}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\ u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\ u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta = h(\theta); \end{aligned}$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}, \quad Q = \text{const} \quad (7)$$

где $\Lambda = \frac{\mu \Omega r_0^2}{p \delta^2}$ – параметр сжимаемости;

$\eta = \frac{e}{\delta}$ – конструктивный параметр; θ_1 и θ_2 – соответственно угловые координаты канавки; Q – расход смазочного материала в единицу времени; $h(\theta)$ – толщина масляной пленки.

Автомодельное решение ищем по известному методу [21 – 22]:

$$\rho v = \frac{\partial \psi}{\partial r} + V(r, \theta), \quad \rho u = -\frac{\partial \psi}{\partial \theta} + U(r, \theta),$$

$$\Psi(r, \theta) = \tilde{\Psi}(\xi), \quad U(r, \theta) = -p\tilde{u}(\xi)h'(\theta),$$

$$V(r, \theta) = p\tilde{v}(\xi),$$

$$\xi = \frac{r}{h(\theta)} \quad \text{при} \quad \theta \leq \theta \leq \theta \quad \text{и} \quad \theta \leq \theta \leq 2\pi,$$

$$\xi = \frac{r + \tilde{h}}{h(\theta) + \tilde{h}} \quad \text{при} \quad \theta \leq \theta \leq \theta, \quad (8)$$

где ψ – функция, зависящая от ξ . V – вертикальная составляющая скорости. U – горизонтальная составляющая скорости. ξ – автомодельная переменная.

Выполнив подстановку (8) в (6), получим:

$$\tilde{\Psi}_i''' = a_i, \quad \tilde{v}_i'' = b_i, \quad \tilde{u}'(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0,$$

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta' T'}} \frac{dp_i}{d\theta} = \left[\frac{b_i}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)} \right], \quad (i = 1, 3), \quad (9)$$

$$h(\theta) = 1 + \eta \cos \theta,$$

$$\frac{p_2}{\Lambda} \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_2}{d\theta} = \left(\frac{b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right).$$

Гидродинамическое давление можно определить из аналитических уравнений:

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_i(\theta)} \frac{dp_i}{d\theta} = \frac{b_i}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)}, \quad i = 1, 3;$$

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_2(\theta)} \frac{dp_2}{d\theta} = \frac{b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) + \tilde{h})^3}. \quad (10)$$

С учетом закономерности изменений скорости диссипации механической энергии из (10) определяется функция $\mu(\theta)$:

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_i^2(\theta)} \frac{d\mu_i}{d\theta} = \frac{\alpha b_i}{h^2(\theta)} + \frac{\alpha a_i}{h^3(\theta)} +$$

$$+ \frac{24\mu_0 \beta \Omega r_0 h(\theta)}{T^* C_p \delta^2 a_i} \cdot \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}''(\xi_i)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}'(\xi_i)}{h^3(\theta)} \right)^2 d\xi, \quad i = 1, 3;$$

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_2^2(\theta)} \frac{d\mu_2}{d\theta} = \frac{\alpha b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\alpha a_i}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} +$$

$$+ \frac{24\mu_0 \beta \Omega r_0 (h(\theta) + \tilde{h})}{T^* C_p \delta^2 a_2} \times$$

$$\times \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}''(\xi_i)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\tilde{v}'(\xi_i)}{(h(\theta) + \tilde{h})} \right)^2 d\xi. \quad (11)$$

Аналитические выражения для давления:

$$p_i = \Lambda \mu_i(\theta) \left(b_i I_2(\theta) + \frac{a_i}{p} I_3(\theta) \right) + \frac{p_g}{p^*}. \quad (12)$$

Результаты численных проверок на основе предложенной теоретической модели представлены на рис. 2, 3. Были протестированы значения параметра сжимаемости $\Lambda = 0,1 \dots 0,9$, напряжения σ в диапазоне 4,7...14,1 МПа.

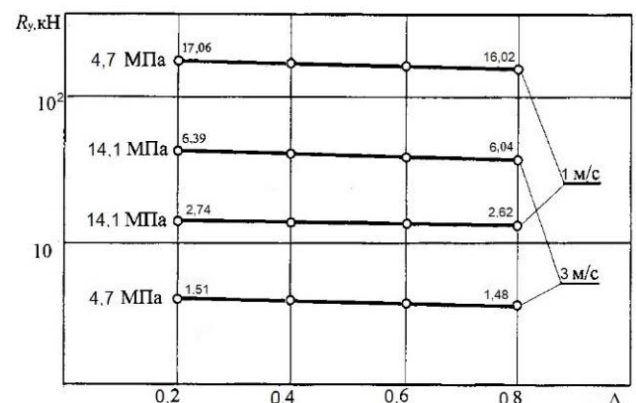


Рис. 2. Изменение вертикальной составляющей

Fig. 2. Change in the vertical component

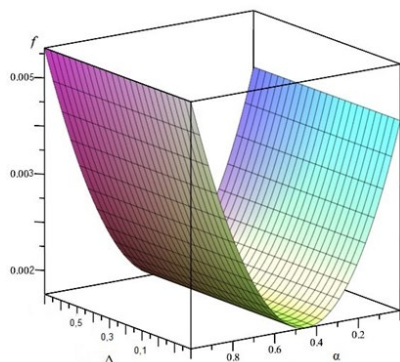


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от параметра сжимаемости и вязкости

Fig. 3. Dependence of friction coefficient on the parameters of compressibility and viscosity

При постоянной температуре сжимаемость минимально влияет на режим эксплуатации показывает рис. 2. Влияние температуры подчеркивает важность контроля для стабильной и эффективной работы системы.

Проведенные проверки подтвердили надежность предложенной теоретической модели в указанных диапазонах параметров. В частности, значения параметра сжимаемости $\Lambda = 0,1 \dots 0,5$, напряжения σ в диапазоне 5,9...29,5 МПа были тщательно протестированы, чтобы убедиться в точности и применимости модели в широком диапазоне сценариев (табл. 1).

1. Зависимость коэффициента трения

1. Dependence of the coefficient of friction

σ , МПа	Параметр сжимаемости Λ				
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
	Коэффициент трения				
5,90	0,008990	0,0113130	0,009800	0,0061000	0,0034300
11,8	0,005790	0,0056910	0,005853	0,0041850	0,0027965
17,7	0,002493	0,0024920	0,002406	0,0022705	0,0021570
23,6	0,002395	0,0023613	0,002304	0,0021136	0,0021379
29,5	0,002197	0,0021307	0,002202	0,0021570	0,0021188

На основе полученных данных был проведен анализ, позволяющий оценить точность расчетной модели. Результаты экспериментов показали, что расчетная модель демонстрирует высокую точность в поведении

конструкции (табл. 1). Все выявленные отклонения находятся в допустимых пределах, что подтверждает надежность и работоспособность модели в различных рабочих условиях.

2. Сравнительный анализ результатов исследования

2. Comparative analysis of the research results

Режим		Теоретический результат	Экспериментальное исследование
σ , МПа	v , м/с	Коэффициент трения	
5,9	0,3	0,0125	0,0132
11,8	0,3	0,0070	0,0071
17,7	0,3	0,0050	0,0048
23,6	0,3	0,0065	0,0071
29,5	0,3	0,0098	0,0104

Заклучение

В соответствии с ранее заданными параметрами канавок, была разработана модель для расчета, которая подробно описывает поведение подшипника в условиях гидродинамического режима. Особое внимание было уделено сжимаемости истинно-вязкого смазочного материала, чей коэффициент вязкости варьируется в зависимости от давления и температуры, а также течению в турбулентном режиме.

В результате проведенного исследования появилась возможность определять основные эксплуатационные характеристики подшипника еще на стадии проектирования. Это значительно улучшает его надежность и срок службы, что является важным шагом в области технологий подшипников и смазочных материалов.

Исследования радиальных подшипников скольжения, проводимые с учетом изменения вязкости при различных давлениях и температурах, а также сжимаемости, привели к уточнению их рабочих характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 4. С. 46–53. DOI 10.31857/S0235711922040101.
2. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Исследование на износостойкость радиального подшипника с нестандартным опорным профилем с учетом зависимости вязкости от давления и температуры // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 3. С. 42–49.
3. Василенко В.В., Кирищев В.И., Мукутадзе М.А., Шведова В.Е. Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2022. Т. 22, № 4. С. 365–372.
4. Абдулрахман Х.Н., Кирищев В.И., Мукутадзе М.А., Шведова В.Е. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 4. С. 9–17.
5. Polyakov R., Savin L. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in

Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, June 12–14, 2017. P. 433–440.

6. Polyakov R., Majorov S., Kudryavcev I., Krupenin N. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability // Vibroengineering Procedia: 44, Vibration and Acoustics in Civil Engineering and Fault Diagnostics, Dubai, 2020. P. 61–67. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21379>.

7. Kornaeва Е.Р., Kornaeв А.В., Kazakov Yu.N., Polyakov R.N. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. P. 012154. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012154>

8. Shutin D.V., Polyakov R.N. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 862, no. 032098.

9. Поляков Р.Н., Савин Л.А., Внуков А.В. Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлением зазором // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2018, № 1(327), С. 66–71.

10. Негматов С.С., Абед Н.С., Саидахмедов Р.Х., Ульмасов Т.У., Григорьев А.Я., Сергиенко В.П., Негматова К.С. и др. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения // Пластические массы. 2020. № 7–8. С. 32–36. DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.

11. Сайфуллаева Г.И., Негматов С.С., Абед Н.С., Камалова Д.И. Исследование электропроводящих композиционных термореактивных полимерных материалов и покрытий на их основе для триботехнического назначения // Universum: технические науки. Электронный научный журнал. 2020. № 12(81). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102>

12. Ерофеев В.Т. Смирнов И.В., Воронов П.В., Афонин В.В., Каблов Е.Н., Старцев О.В. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-5. С. 911–924. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (20.08.2024).

13. Кочешков И. В. Анализ понятия и принципов создания композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 2 (56). С. 3–11.

14. Zinoviev V.E., Kharlamov P.V., Zinoviev N.V., Kornienko R.A. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012009>

15. Харламов П.В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1. С. 122–129. DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_122.

16. Харламов П.В. Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3. С. 37–45. DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_37.

17. Харламов П.В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 12. С. 556–560. DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560.

18. Шаповалов В.В., Щербак П.Н., Богданов В.М., Фейзов Э.Э., Харламов П.В., Фейзова В.А. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78, № 3. С. 177–182. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182>. EDN ZZGAOL.

19. Shapovalov V.V., Kolesnikov V.I., Kharlamov P.V., Kornienko R.A., Petrik A.M. Improving the efficiency of the path – rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900 (1). P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012011>

20. Шаповалов В.В., Мигаль Ю.Ф., Озябкин А.Л., Колесников И.В., Корниенко Р.А., Новиков Е.С. Металлоплакирование рабочих поверхностей трения пары «колесо – рельс» // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 4. С. 464–474. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474>. EDN WPTWDK.

21. Мукутадзе М.А., Абдулрахман Х.Н., Шведова В.Е., Бадахов Г.А., Зиновьев Н.В. Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 5–14. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-187-5-14>. EDN IKFMSX

22. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Improved wear resistance of a metal-coated radial slider bearing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022. V. 51. № 2. P. 128–133.

REFERENCES

1. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar lubricants and metal coating melts // Problems of mechanical engineering and machine reliability, 2022, no. 4. pp. 46–53. DOI 10.31857/S0235711922040101.

2. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. A study on the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile, taking into account the dependence of viscosity on pressure and temperature // Problems of mechanical engineering and automation, 2023, no. 3, pp. 42–49.

3. Vasilenko V.V., Kirishieva V.I., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. Investigation of the wear resistance of a journal bearing with polymer-coated grooved support ring // Advanced

Engineering Research (Rostov-on-Don), 2022, vol. 22, no. 4, pp. 365–372.

4. Abdulrahman Kh.N., Kirishieva V.I., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. Increasing the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer coating on the shaft surface, taking into account the dependence of viscosity on pressure // Frontier Materials & Technologies, 2022, no. 4, pp. 9–17.

5. Polyakov R., Savin L. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, June 12–14, 2017. P. 433–440.

6. Polyakov R., Majorov S., Kudryavcev I., Krupenin N. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability // Vibroengineering Procedia : 44, Vibration and Acoustics in Civil Engineering and Fault Diagnostics, Dubai, 2020. P. 61–67. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21379>.

7. Kornaeva E.P., Kornaev A.V., Kazakov Yu.N., Polyakov R.N. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. P. 012154. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012154>

8. Shutin D.V., Polyakov R.N. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 862, no. 032098.

9. Polyakov R.N., Savin L.A., Vnukov A.V. Mathematical model of the inflammatory pullic seal with active management of the clearance // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, 2018, no. 1(327), pp. 66–71.

10. Negmatov S.S., Obed N.S., Saidakhmedov R.H., Ulmasov T.U., Grigoriev A.Ya., Sergienko V.P., Negmatova K.S. et al. Research of viscoelastic and adhesion-strength property and development of effective vibration absorbing composite polymeric materials and coatings of mechanical engineering purpose // Plastic Masses, 2020, no. 7-8, pp. 32–36. DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.

11. Saifullayeva G.I., Negmatov S., Abed N.S., Kamalova D.I. Research of electrically conductive composite thermoreactive polymer materials and coatings on their basis for tribotechnical purpose // Universum: technical sciences. Electronic scientific journal, 2020, no. 12(81). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102>

12. Yerofeev V.T., Smirnov I.V., Voronov P.V., Afonin V.V., Kablov E.N., Startsev O.V. Investigation of the resistance of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast // Fundamental Research, 2016, no. 11-5, pp. 911–924. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (08/20/2024).

13. Kocheshkov I. V. Analysis of definition and principles of composite materials development. // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2016, no. 2 (56), pp. 3–11.

14. Zinoviev V.E., Kharlamov P.V., Zinoviev N.V., Kornienko R.A. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012009>

15. Kharlamov P.V. Monitoring measurements in elastic-dissipative characteristics for solving tasks on studying tribological processes in the «Railway - rolling stock» system // Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications, 2021, no. 1, pp. 122–129. DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_122.

16. Kharlamov P.V. Application of the physico-chemical approach to study the mechanism of formation of secondary frictional transfer structures on the control surface // Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport, 2021, no. 3, pp. 37–45. DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_37.

17. Kharlamov P.V. Investigation of the formation of secondary frictional transfer structures on the surface of steel samples during the implementation of metal plating technology // Assembly in mechanical engineering, instrument engineering, 2021, no. 12, pp. 556–560. DOI 10.36652/02-3350-2021-22-12-556-560.

18. Shapovalov V.V., Shcherbak P.N., Bogdanov V.M., Feizov E.E., Kharlamov P.V., Feizova V.A. Improving the efficiency of the wheel–rail friction system // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport, 2019, vol. 78, no. 3, pp. 177–182. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182>. EDN ZZGAOL.

19. Shapovalov V.V., Kolesnikov V.I., Kharlamov P.V., Kornienko R.A., Petrik A.M. Improving the efficiency of the path – rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 900 (1). P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012011>

20. Shapovalov V.V., Migal Yu.F., Ozyabkin A.L., Kolesnikov I.V., Kornienko R.A., Novikov Ye.S. Metal plating of the friction working surfaces of the wheel–rail pair // Friction and wear, 2020, vol. 41, no. 4, pp. 464–474. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474>. EDN WPTWDK.

21. Mukutadze M.A., Abdulrahman Kh.N., Shvedova V.E., Badakhov G.A., Zinoviev N.V. Studies on wear resistance of the radial bearing design taking into account rheological properties of micropolar lubricant // Omsk Scientific Bulletin, 2023, no. 3 (187), pp. 5–14.

22. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Improved wear resistance of a metal-coated radial slider bearing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022. V. 51. № 2. P. 128–133.

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 14.10.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 06.12.2024

The article was submitted 14.10.2024; approved after reviewing 02.12.2024; accepted for publication 06.12.2024

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №3 (165). С. 38-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 38-48.

Научная статья

УДК 67.017: 539.43

doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-38-48

Анализ особенностей механики контакта бандажа и опорных роликов вращающихся печей

Константин Васильевич Макаренко¹, д.т.н.

Александр Александрович Азаркин², аспирант

Александр Викторович Вдовин³, к.т.н.

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

² Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия

¹ makkon1@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7195-0500>

² jarret@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-9170-4114>

³ vdovin.alexander.v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6014-0043>

Аннотация. Изложены основы конструкции вращающихся печей, широко используемых при переработке и подготовке различного сырья и материалов. Показано, что слабым местом конструкции вращающихся печей являются опорные ролики, которые несут всю нагрузку печи и изначально изготовлены из менее прочной стали, чем контактирующий с ними бандаж. Фактически в самой конструкции заложена возможность периодической замены «расходной части» – опорного ролика. Однако для промышленника любой простой оборудования приводит к экономическим потерям. Поэтому была сформулирована цель: повысить долговечность опорных роликов без существенного изменения конструкции печи. Для этого первоначально, с позиции контактной механики, были изучены основы взаимодействия поверхностей опорного ролика и бандажа вращающейся печи. Приведены расчетные модели для различных вариантов контактирования этих деталей. Изучена силовая модель контакта поверхностей опорного ролика и бандажа. Определены максимальные нормальные и касательные напряжения в зоне контакта, на его границе и за ее пределами. При этом в зоне контакта поверхностей ролика и бандажа происходят сложные процессы, в частности, микропроскальзывание и скольжение, что обусловлено различием в диаметрах вращающихся тел и разницей в уровне их механических свойств. Микропроскальзывание является одним из источников фреттинг-коррозии. Однако наиболее существенный износ происходит в результате механического взаимодействия и изменения структуры поверхностного слоя с постепенным накоплением в нем различного рода дефектов кристаллического строения, обусловленных пластическим деформированием поверхностного слоя контактирующих деталей. Показано, что существенное влияние на процесс изнашивания опорных роликов оказывают не только механические и эксплуатационные свойства материала, из которого они изготовлены, но и смещения пятна контакта при работе печи. Смещение может быть угловым или линейным, а в реальных условиях чаще всего комбинированным, оно обусловлено температурным расширением / сжатием металла конструкции и условиями работы вращающейся печи.

Ключевые слова: вращающиеся печи, опорные ролики, бандаж, пятно контакта, износ, пластическая деформация, поверхностный слой

Для цитирования: Макаренко К.В., Азаркин А.А., Вдовин А.В. Анализ особенностей механики контакта бандажа и опорных роликов вращающихся печей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 3 (165). С. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-38-48

Analysis of contact mechanics of a bandage and support rolls of rotary kilns

Konstantin V. Makarenko¹, D. Eng.

Alexander A. Azarkin², PhD student

Alexander V. Vdovin³, PhD Eng.

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

² Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia

¹ makkon1@yandex.ru

² jarret@mail.ru

³ vdovin.alexander.v@yandex.ru

Abstract. The basics of the design of rotary kilns, widely used in the processing and preparation of various raw materials, are described. It is shown that the weak point of the rotary kilns design is the support rollers, which carry the entire load of the kiln and are initially made of less durable steel than a bandage being in contact with them. In fact, the design itself provides for the possibility of periodic replacement of the «miscellaneous part», which is a support roller. However, for an operator, any downtime of equipment leads to economic losses. Therefore, the goal has been formulated: to increase the durability of the support rollers avoiding a significant change in the kiln design. For this purpose, initially, from the point of view of contact mechanics, the basics of the interaction of the surfaces of the support roller and the bandage of a rotary kiln have been studied. Calculation models for various contact options of these parts have been given. The force model of contact between the surfaces of the support roller and the bandage has been studied. The maximum normal and tangential stresses in the contact zone, at its boundary and beyond have been determined. At the same time, complex processes occur in the contact area of the roller and the bandage surfaces, in particular, micro-slipping and sliding, due to the difference in the diameters of the rotating bodies and the difference in the level of their mechanical properties. Micro-slip is one of the sources of fretting wear. However, the most significant wear occurs as a result of mechanical interaction and changes in the structure of the surface layer with the gradual accumulation of various kinds of defects in the crystalline structure caused by plastic deformation of the surface layer of the contacting parts. It is shown that not only the mechanical and operational properties of the material for their construction, but also the displacement of the contact spot during kiln operation have a significant effect on the wear process of the support rollers. The displacement can be angular or linear, and in real conditions it is most often combined, it is caused by the thermal expansion / compression of the metal structure and the operating conditions of the rotary kiln.

Keywords: rotary kilns, support rollers, bandage, contact spot, wear, plastic deformation, surface layer

For citation: Makarenko K.V., Azarkin A.A., Vdovin A.V. Analysis of contact mechanics of a bandage and support rolls of rotary kilns / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-38-48

Введение

Для дальнейшего использования многие сыпучие материалы (цемент, фосфаты, оксиды кальция и алюминия, сульфиды и т. д.) должны подвергаться дополнительной обработке – обжигу, сушке, прокаливанию, спеканию, кальцинации и т.д. Самым эффективным оборудованием являются вращающиеся печи, отличающиеся простотой конструкции [1, 2]. Сырьё загружают в сушильный барабан (рис. 1), на который насажены кольца-обечайки – металлические бандажы, которые опираются на специальные вращающиеся ролики. Вращение осуществляется электродвигателем через редуктор, шестерню и зубчатый венец,

закрепленный на корпусе барабана [2]. Барабан располагается под небольшим углом ($7...12^\circ$), что позволяет сырью перемещаться внутри под действием своего веса. Обладая внушительными размерами (диаметр 3 м, длина 25 м), сушильный барабан может перемещаться в осевом направлении, что может привести к сходу его с опорных роликов, для предотвращения которого используются упорные ролики. Эти ролики выполняют одновременно контрольную и страхующую функции: в нормальном состоянии упорные ролики не вращаются, в случае предаварийной ситуации ролики начинают вращаться и предотвращают барабан от дальнейшего смещения.

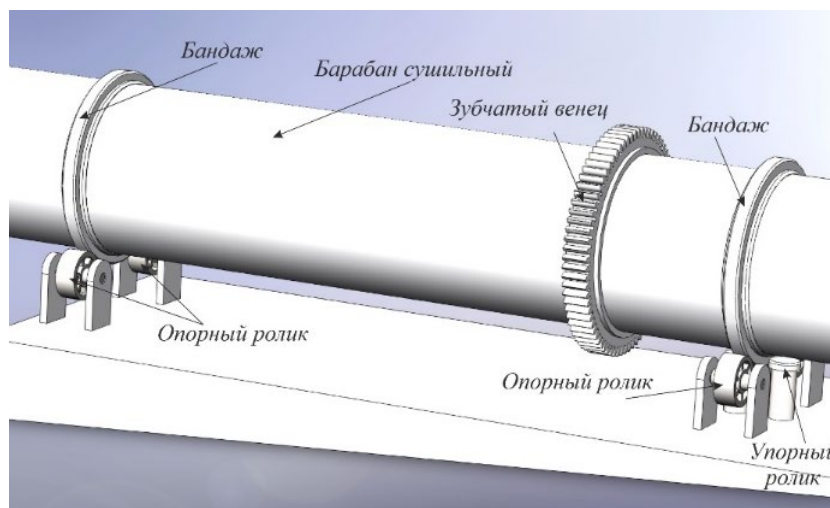


Рис. 1. Упрощенная схема вращающейся печи

Fig. 1. Simplified diagram of a rotary furnace

Слабым местом конструкции являются опорные ролики, которые, обладая меньшей твердостью по сравнению с бандажом, являются, по сути, «расходным материалом». Но ввиду высокой металлоёмкости (диаметр 800 мм, ширина 350 мм) цена их значительна. Поэтому перед производством стоит задача по увеличению срока службы опорных роликов без ущерба для долговечности бандаж.

Целью представленной работы является исследование процессов достижения предельного состояния опорными роликами с позиции механики контактного взаимодействия и определение влияния условий работы на их долговечность.

Несмотря на кажущуюся очевидность процессов, приводящих к достижению предельного состояния опорного ролика, изучим более детально данный вопрос с позиции механики контактного взаимодействия [4]. Бандаж барабана и опорный ролик представляют собой упругие цилиндрические тела (рис. 2, а), отличающиеся по диаметру (3000 мм и 800 мм) и ширине (200 мм и 350 мм), при перекачивании которых в условиях силового взаимодействия, зоны контактирующих поверхностей качения в определенный момент времени формируют поверхность давления или пятно контакта [5].

При общем подходе задача качения рассматривается для контакта двух осесимметричных упругих тел, одно из которых является опорным роликом 1, а второе бандажом 2

(рис. 2). При геометрически идеальном расположении тела прижаты друг к другу по линии контакта и вдоль общей нормали z к их поверхности действует сила P , определяемая весом вращающейся печи. Оба тела вращаются относительно собственных осей I и II с угловыми скоростями ω_1 и ω_2 , соответственно. При идеализированном подходе в случае свободного качения и симметрии тел относительно их осей вращения, силы взаимодействия между ними не изменяются в процессе вращения печи, в этом случае пятно контакта должно иметь постоянную форму. В соответствии с теорией Герца для упругого взаимодействия пятно контакта будет иметь форму полосы с шириной $2b$, которую можно определить по уравнению [12]:

$$b = 1,6 \left[\frac{P \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}{L \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где P – нормальная сила; L – длина полосы контакта, для упругого взаимодействия равная ширине бандаж; ν – коэффициент Пуассона (сейчас и далее, для материала: 1 – опорного ролика и 2 – бандаж); E – модуль Юнга; D – диаметр.

Максимальное напряжение сжатия для системы взаимодействия двух соосных цилиндрических тел, определяют по уравнению [12]:

$$\sigma_{сж(max)} = 0,798 \left[\frac{P}{L} \frac{\left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right)}{\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Как следует из уравнений (1) и (2) для заданных геометрии и свойств материалов контактное давление и вызванные им напряжения возрастают прямо пропорционально линейному размеру области контакта.

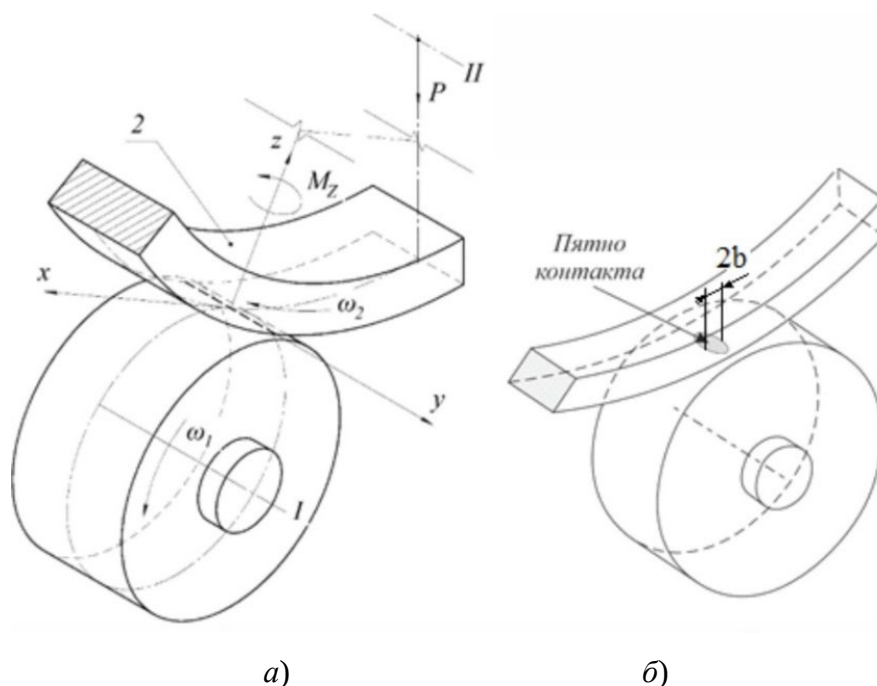


Рис. 2. Схемы контакта поверхностей бандажа и опорного ролика:

a – силового взаимодействия; *б* – формирование пятна контакта при упругопластическом взаимодействии

Fig. 2. Contact schemes of the surfaces of the bandage and the support roller:

a – force interaction; *b* – formation of a contact spot under elastoplastic interaction

Распределение давления по площади контакта и напряжений в зоне контакта вдоль линии взаимодействия двух цилиндров (опорного ролика и бандажа) представлено на рис. 3. При качении наиболее нагружены несколько участков: во-первых, непосредственно под поверхностью максимальных значений достигают касательные напряжения; во-вторых, на самой поверхности имеются два участка, представленные максимальным давлением в пределах пятка контакта и максимальные растягивающие напряжения, выходящие за зону контакта [15].

Как следует из анализа распределения касательных напряжений их максимальное

значение соответствует глубине $0,78b$ [13]. При работе в зоне контакта поверхностей опорного ролика и бандажа наиболее нагруженной оказывается центральная часть дорожки качения. При этом наиболее существенное влияние на процесс изнашивания поверхности опорного ролика оказывают растягивающие напряжения, возникающие на границе пятна контакта. При этом, учитывая циклический характер нагружения поверхностей контакта при работе печи, в пределах сформировавшейся дорожки качения по всем участкам материала последовательно проходят и растягивающие и сжимающие напряжения.

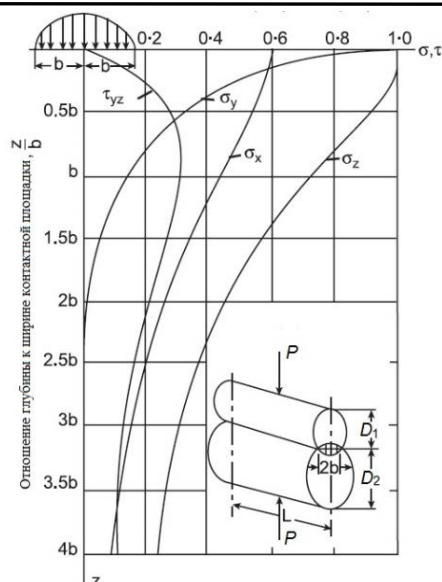


Рис. 3. Распределение нормальных σ_x , σ_y , σ_z и касательных τ_{yz} напряжений вдоль оси z в глубину материала от поверхности контакта опорного ролика с бандажом [12]

Fig. 3. Distribution of normal σ_x , σ_y , σ_z and tangential τ_{yz} stresses along the z axis into the depth of the material from the contact surface of the support roller with a bandage [12]

Смоделировал условия контакта между двумя цилиндрическим упругими телами К. Джонсон в своей классической работе [4]. Деформации возникают на контактирующих поверхностях опорного ролика и бандажа при приложении нормальной силы P ,

обусловленной весом ее конструкции и материалом в нее загруженным (рис. 4). При взаимном сжатии точки в материалах контактирующих деталей I и II смещаются на расстояния δ_1 и δ_2 вдоль оси z по направлению к точке O .

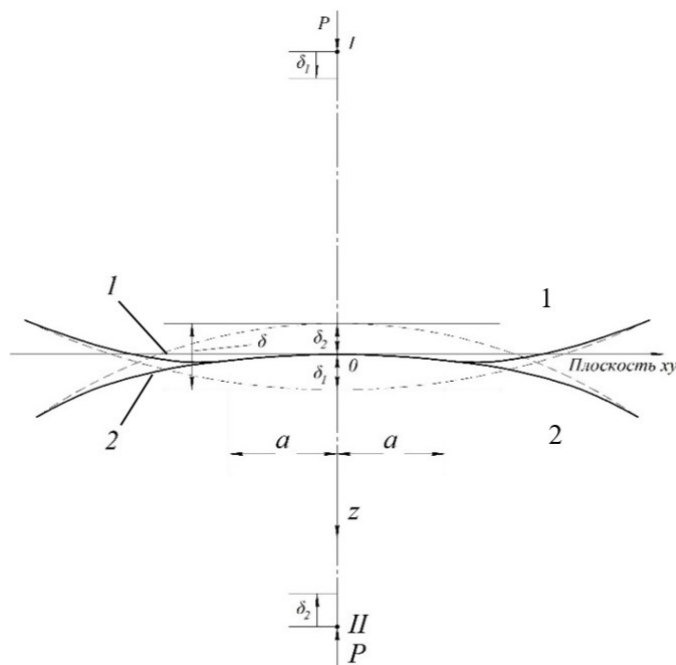


Рис. 4. Герцевский контакт двух цилиндрических тел, для случая взаимодействия поверхностей опорного ролика и бандажа: 1 – недеформированные поверхности; 2 – деформированные поверхности

Fig. 4. Hertz contact of two cylindrical bodies, for the case of interaction of the surfaces of the support roller and the bandage: 1 – undeformed surfaces; 2 – deformed surfaces

В действительности, т. к. материалы тел 1 и 2 изначально отличаются по свойствам, то дифференциальный параметр, предложенный К. Джонсоном [4, 5] будет иметь вид:

$$\frac{K}{G} = \frac{\frac{1 - 2\nu_2}{G_2} - \frac{1 - 2\nu_1}{G_1}}{4} \neq 0, \quad (3)$$

где G – модуль упругости.

В области контакта возможно проскальзывание по причине разности тангенциальных деформаций на контактирующих поверхностях, имеющих различные упругие свойства.

Следующей особенностью контакта бандажа и опорных роликов является то, что радиусы поверхностей опорного ролика и бандажа различны $R_1 < R_2$, поэтому на поверхностях давления возникают касательные силы, вызывающие микропроскальзывание точек тел в областях, прилегающих к внешнему контуру пятна контакта. При этом в контактной задаче взаимодействия двух упругих цилиндрических тел различают процессы микропроскальзывания и скольжения.

Скольжение в отличие от микропроскальзывания представляет собой разность скоростей точек абсолютно твердых тел. Так как при работе вращающихся печей угловые скорости $\omega_1 \neq \omega_2$ качение тел будет сопровождаться дополнительно верчением. Относительные скольжения тел вдоль осей x и y называют продольным и поперечным крипом соответственно, а верчение относительно оси z – спином (M_z). О. Рейнольдс [6] обнаружил, что зона контакта разбивается на зону сцепления и микропроскальзывания, которые зависят от сил трения и упругих и / или пластических деформаций. Микропроскальзывание, возникающее при контакте поверхностей опорного ролика и бандажа, является одним из источников фреттинг-коррозии – формы повреждения поверхностей контакта, проявляющееся в результате специфического трения двух поверхностей друг о друга [14].

По внешнему виду роликов (рис. 5), эксплуатирующихся достаточно продолжительное время можно сделать вывод, что есть отличие в особенностях работы каждой пары роликов.

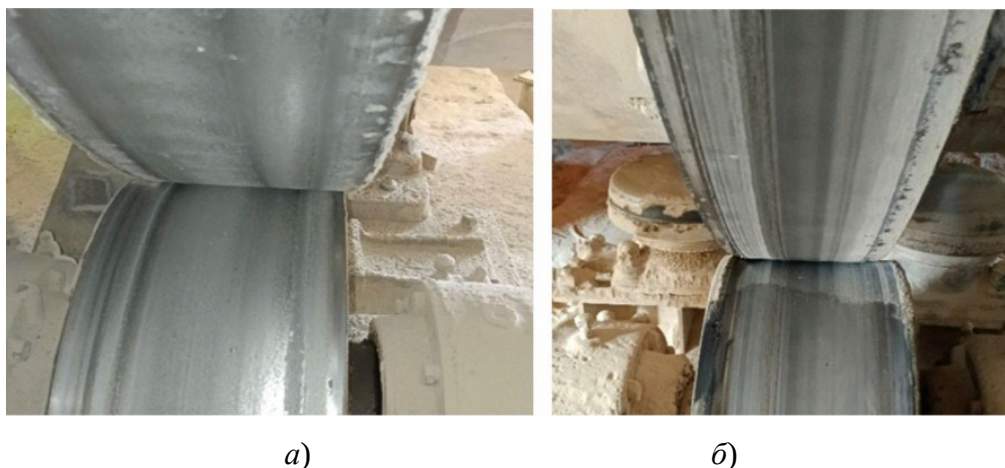


Рис. 5. Расположение бандажа на поверхности верхней пары (а) и нижней пары (б) опорных роликов

Fig. 5. The location of the bandage on the surface of the upper pair (a) and the lower pair (b) of the support rollers

На поверхности верхних роликов бандаж смещается ближе к центру тяжести барабана, постепенно «сползая» с края. На поверхности нижних роликов – бандаж поворачивается, как бы «врезаясь» в их поверхность: ближе к центру тяжести барабана канавка глубже. Причины такого расположения бандажа на опорных роликах в следующем: в

процессе эксплуатации происходит провисание центра сушильного барабана под действием силы тяжести (рис. 6), что приводит к нарушению соосности бандажа и верхней пары роликов (но при этом оси остаются в одной плоскости). Так как барабан расположен под углом – соосность нижней пары роликов и бандажа изменяется не так значительно.

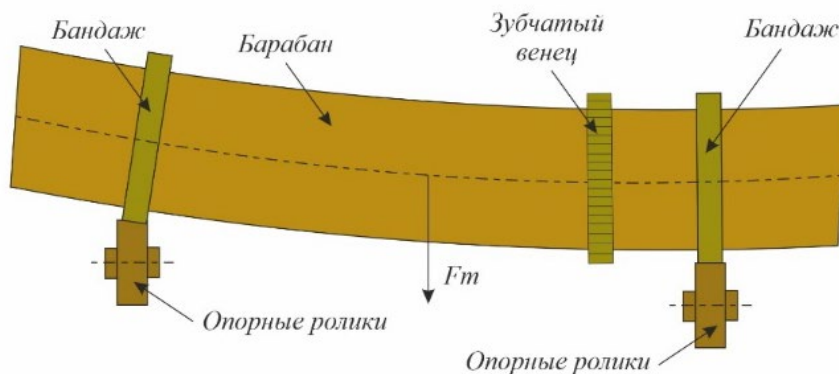


Рис. 6. Изгиб барабана

Fig. 6. Bending of the drum

Такое расположение бандажей приводит к изменению пятна контакта (рис. 7), что влечет за собой перераспределение усилий и смещение площадки контактного

взаимодействия. Наибольшее усилие сместится на боковые части опорных роликов, расположенные к центру барабана.

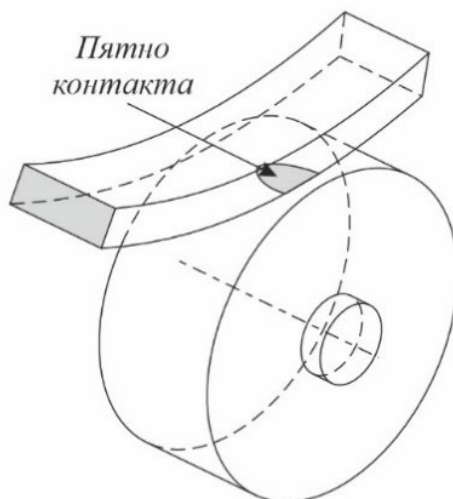


Рис. 7. Схема контакта поверхностей бандажа и опорного ролика с учетом изгиба барабана

Fig. 7. Contact diagram of the surfaces of the bandage and the support roller, taking into account the bending of the drum

В результате бандаж будет деформировать верхний опорный ролик, образуя своеобразный «козырёк» (рис. 8, а), который направлен к центру тяжести барабана. Для нижней пары роликов бандаж, расположенный практически по центру опорного ролика, будет деформировать его поверхность немного иначе, перераспределение усилий приводит к образованию дорожки качения или «жёлоба», более

глубокая часть которого направлена к центру тяжести барабана (рис. 8, б).

На основании проведенного анализа можно рекомендовать: для избежания образования дефекта типа «козырек» на поверхности опорных роликов, упрочнять методами термобработки или наплавки боковую «не рабочую» поверхность опорного ролика.

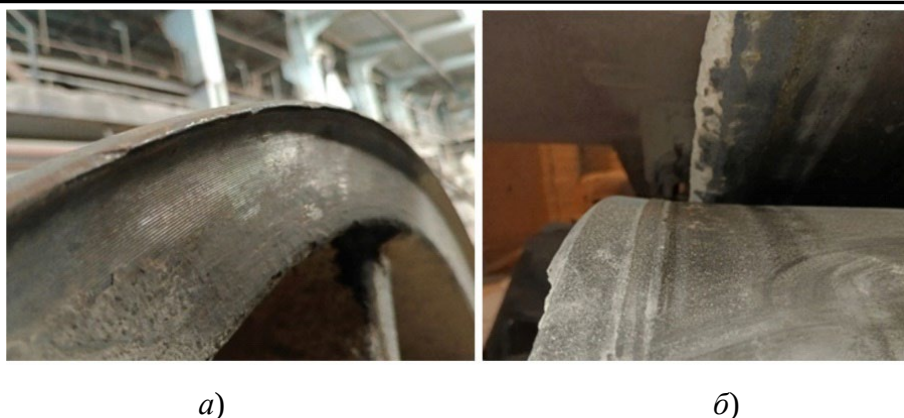


Рис. 8. Результат деформации верхнего (а) и нижнего (б) опорных роликов

Fig. 8. The result of deformation of the upper (a) and lower (b) support rollers

При этом что важно, даже расположенные на одном уровне опорные ролики в процессе работы вращающейся печи нагружены крайне неравномерно. Теоретическое распределение сил на опорные ролики при использовании расчетов на прочность узлов печи показано на рис. 9. Однако в процессе работы масса загруженного материала, подвергающегося сушке в печи, за счет ее вращения смещается в

одну сторону (рис. 9, б), что приводит к перераспределению нагрузки на поверхность опорного ролика. В реальном производстве наиболее быстро предельного состояния достигает наиболее сильно нагруженный один ролик в нижней паре, однако при проведении ремонтных работ приходится одновременного заменять пару опорных роликов, что экономически не целесообразно.

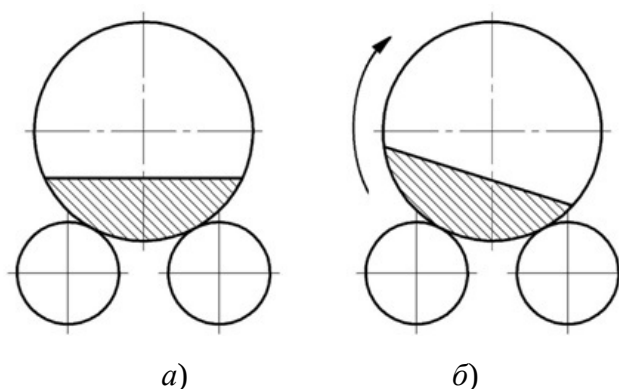


Рис. 9. Учет влияния нагрузки от обрабатываемого материала в силовых схемах расчета вращающихся печей [13]:

а – в теоретических расчетах большинства работ [1 – 3]; б – в реальном производстве с учетом вращения печи в процессе ее работы

Fig. 9. Taking into account the influence of the load from the processed material in the power calculation schemes of rotary furnaces [13]:

а – in theoretical calculations of most works [1 – 3]; б – in real production, taking into account the rotation of the furnace during its operation

Существенное влияние на процесс изнашивания опорных роликов оказывают не только механические и эксплуатационные свойства материала, из которого они изготовлены, но и смещения пятна контакта при работе печи. Смещение может быть угловым или линейным, а чаще всего комбинированным,

оно обусловлено температурным расширением / сжатием металла конструкции печи, и в свою очередь определяется температурными условиями работы печи, суточными и сезонными температурными колебаниями [11]. Кроме этого, элементы печи подвержены циклическим воздействиям, обусловленным

вращением корпуса печи и работой механизма привода, что также приводит к отклонениям при контакте поверхностей опорных роликов и бандажа.

Однако наиболее существенный вклад в изнашивание поверхности опорных роликов вносит процесс изнашивания отслаиванием, проявляющейся в виде отделения тонких чешуек или пластинок (рис. 10) охрупченного

материала, и питтинг, представляющий собой образование «язвочек» углублений при выкрашивании локальных, микроскопических участков на поверхности в пределах дорожки качения [15]. Процесс изнашивания по данному механизму обусловлен накоплением дислокаций при пластической деформации поверхности контактирующих деталей.

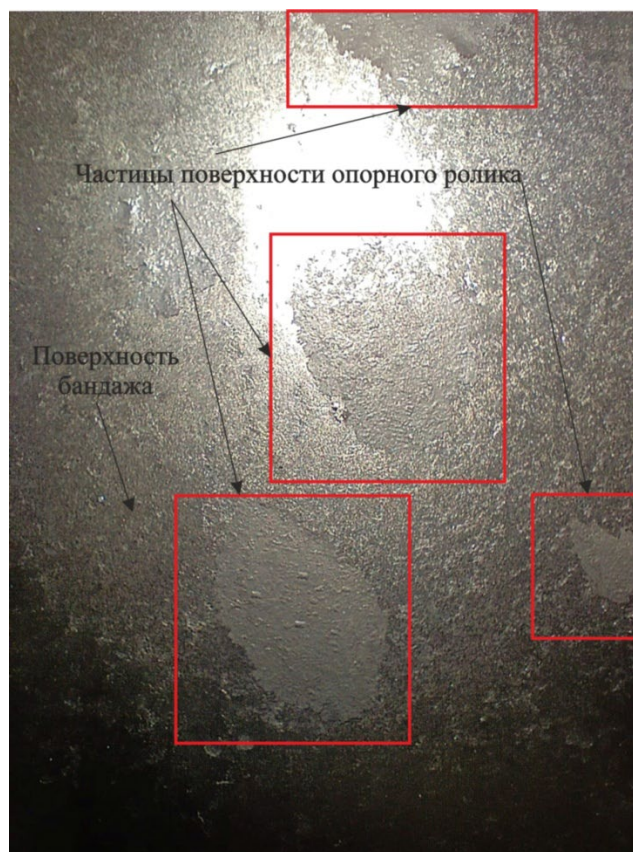


Рис. 10. Поверхность бандажа с отслоившимися частицами материала опорного ролика

Fig. 10. The surface of the bandage with detached particles of the support roller material

В итоге поверхностные слои металлов в пятне контакта подвергаются не только деформациям, но и механическому трению, которое в условиях цеховой запыленности и влажности усугубляется дополнительно абразивным и водородным изнашиванием. Таким образом, в процессе работы печи рабочие поверхности опорных роликов подвергаются сложному, комбинированному воздействию различных негативных факторов, приводящих к реализации разнообразных процессов износа, что оказывает существенное влияние на достижение

предельного состояния опорных роликов вращающихся печей.

Выводы

Расчеты вращающихся печей ведут исходя из предположения, что соприкосновение происходит по классической теории Герца: пятно контакта имеет эллиптическую форму, основная нагрузка должна приходиться на центральную часть опорного ролика.

В процессе эксплуатации ряд факторов (конструкционные и эксплуатационные)

приводит к повышению касательных сил, которые кроме качения способствуют возникновению продольного и поперечного крипа и спина, вызывая перераспределение нагрузок, что приводит к смещению основной нагрузки на края опорных роликов, что, в свою очередь, вызывает изменения внутренних напряжений поверхностного слоя и его деформацию.

В итоге поверхностные слои металлов в пятне контакта подвергаются не только деформациям, но и механическому трению, которое в условиях цеховой запыленности и влажности усугубляется абразивным и водородным изнашиванием.

Одним из методов решения проблемы повышения ресурса опорных роликов – упрочнение структуры боковых поверхностей опорных роликов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 1 / Под ред. В.Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2004. 688 с.
2. Барабанные вращающиеся аппараты: учеб. пособие / Э.А. Козловский, А.Э. Козловский, И.А. Повtarev; Иван. гос. хим-технол. ун-т. Иваново: ИГХТУ, 2019. 106 с.
3. ОСТ 26-01-147-89. Аппараты сушильные с вращающимися барабанами. Общие технические требования.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон; пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
5. Сакало В.И., Коссов В.С. Контактные задачи железнодорожного транспорта. М.: Машиностроение, 2004. 496 с.
6. Котов С.Ю., Шкин' Н.В. Анализ теории трения качения О. Рейнольдса // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилев, 25-26 октября 2018 г. / редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2018. С. 70–71.
7. Гончаров М.С., Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В. Исследование пятна контакта бандаж цементной печи и опорного ролика // сб. докл. Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова. Белгород, 2013. С. 536–540.
8. Шрубченко И.В., Кузнецова И.В. Исследование характеристик пятна контакта поверхностей качения технологических барабанов // Материалы V межрегиональной научно-технической конференции с международным участием «Механика XXI века». Братск, 2006. С. 242–246.

9. Колобов А.В., И.И. Кузнецова М.И. Шрубченко Д.В. Кривенченко Определение характеристик пятна контакта бандажей и роликов технологического барабана / Наука и молодежь в начале нового столетия: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молод. учен., Губкин, 12-13 апреля 2007 г. / Губкин. филиал Белгор гос. технол. ун-та; Губкин: ИП Уваров В.М., 2007. С. 198–201.

10. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Sharapov R.R., Duyun T.A. & Shchetinin N.A. Investigation of Characteristics of Contact Bandages and Support Rollers of Rotating Technological Drums // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, № 1. pp. 195–203.

11. Азаркин, А.А., Макаренко К.В. Исследование влияния рабочего нагрева на достижение предельного состояния опорных роликов вращающихся печей // Актуальные вопросы техники, науки, технологии: сборник научных трудов национальной конференции 07-10 февраля 2024 г./ под общ. ред. Т.Э. Сергутиной. Брянск, Брян. гос. инженер.-технол. ун-т. 2024. С. 123–126.

12. Lingaiah K. Machine Design Databook / New York: McGraw-Hill, 2003. 1332 p.

13. Žiga, A., Karač A., Vukojević D. The Contact Stresses Between Cement Kiln Tyre and Supporting Rollers // 12th International Research/Expert Conference «Trends in the Development of Machinery and Associated Technology» TMT2008, Istanbul, Turkey, 26-30 August, 2008. pp. 793–796.

14. François D. Pineau A, Zaoui A. Mechanical Behaviour of Materials. V. II: Fracture Mechanics and Damage / Dominique Françoise. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer, 2013. 662 p.

15. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Машиностроение, 1999. 544 с.

REFERENCES

1. Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G. Rotary kilns: heat engineering, management and ecology, Book 1, Heating engineer, / Edited by V.G. Lisienko. Moscow: Teplotekhnika, 2004. 688 p.
2. Drum rotating apparatuses: study guide. manual / E.A. Kozlovsky, A.E. Kozlovsky, I.A. Povtarev; Ivan. State Chemical and Technological University. Ivanovo: ISChTU, 2019, 106 p.
3. All-Union Standard 26-01-147-89. Drying machines with rotating drums. General technical requirements.
4. Johnson, K. Mechanics of contact interaction / K. Johnson; translated from English. Moscow: Mir, 1989, 510 p.
5. Sakalo V.I., Kossov V.S. Contact tasks of railway transport. Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, 496 p.
6. Kotov S.Yu., Shkin' N.V. Analysis of O. Reynolds rolling friction theory // New materials, equipment and technologies in industry: proceedings of the International scientific and technical conference of young scientists, Mogilev, October 25-26, 2018 / Editor: I. S. Sazonov (chief editor) [et al. Mogilev: Belarusian-Russian University, 2018. pp. 70–71.
7. Goncharov M.S., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V. Investigation of the contact spot of a

cement kiln bandage and support roller. The International Scientific and Technical Conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov, dedicated to the 160th anniversary of the birth of V.G. Shukhov. Belgorod, 2013, pp. 536–540.

8. Shrubchenko I.V., Kuznetsova I.V. Investigation of the characteristics of the contact patch of the rolling surfaces of technological drums // Proceedings of the V Interregional scientific and technical conference with international participation «Mechanics of the XXI century». Bratsk, 2006, pp. 242–246

9. Kolobov A.V., And.And. Kuznetsova M.I., Shrubchenko D.V. Definition characteristic of the contact spot of a bandage and technological drum rollers / Science and youth at the beginning of the new century: proceedings of the International research - practical. conf. for students, post-graduates and young researches, Gubkin, 12-13 April 2007 / Gubkin. Belgorod branch of Belgorod State Technol. Un-ty; Gubkin: PE Uvarov V.M., 2007, pp. 198–201.

10. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Sharapov R.R., Duyun T.A. & Shchetinin N.A. Investigation of Characteristics of Contact Bandages and Support Rollers of

Rotating Technological Drums // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, № 1. pp. 195–203.

11. Azarkin, A.A., Makarenko K.V. Investigation of the effect of working heating on reaching the limiting state of the support rollers of rotary kilns // Actual issues of engineering, science, technology: proc. of the national conference on February 07-10, 2024/ under the general editorship of T.E. Sergutina. Bryansk, Bryan. state engineer.-technol. univ., 2024, pp. 123–126.

12. Lingaiah K. Machine Design Databook / New York: McGraw-Hill, 2003. 1332 p.

13. Žiga, A., Karač A., Vukojević D. The Contact Stresses Between Cement Kiln Tyre and Supporting Rollers // 12th International Research/Expert Conference «Trends in the Development of Machinery and Associated Technology» TMT2008, Istanbul, Turkey, 26-30 August, 2008. pp. 793–796.

14. François D. Pineau A, Zaoui A. Mechanical Behaviour of Materials. V. II: Fracture Mechanics and Damage / Dominique Françoise. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer, 2013. 662 p.

15. Morozov E.M., Zernin M.V. Contact problems of fracture mechanics. Moscow: Mashinostroenie, 1999, 544 p.

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

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

Статья поступила в редакцию 16.01.2025; одобрена после рецензирования 28.01.2025; принята к публикации 04.02.2025

The article was submitted 16.01.2025; approved after reviewing 28.01.2025; assepted for publication 04.02.2025

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

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

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

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

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

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

Сдано в набор 17.03.2025. Выход в свет 28.03.2025.

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

