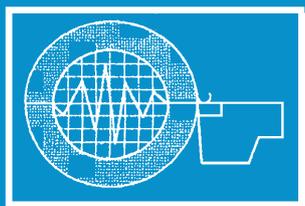


ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского
государственного
технического
университета

ISSN 1990-5297



Серия
Прогрессивные технологии
в машиностроении

16+

№ 1 (308)
2026

Главный редактор научного журнала
«Известия Волгоградского государственного технического университета»
академик РАН, профессор, доктор химических наук
И. А. НОВАКОВ

Редакционная коллегия:

- Брискин Е. С.** – д-р физ.-мат. наук, профессор ВолгГТУ, г. Волгоград
Буренин А. А. – чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре
Витязь П. А. – академик Национальной академии наук Беларуси (НАНБ), Институт порошковой металлургии, г. Минск, Республика Беларусь
Голованчиков А. Б. – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ, г. Волгоград
Заякин О. В. – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, Институт металлургии им. Н. А. Ватолина УрО РАН, г. Екатеринбург
Злотин С. Г. – чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор, Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН, г. Москва
Иванов В. К. – академик РАН, д-р хим. наук, профессор, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, г. Москва
Ингеманссон А. Р. – д-р техн. наук, АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград
Калита В. И. – д-р техн. наук, профессор, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, г. Москва
Коберник Н. В. – д-р техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва
Колмаков А. Г. – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, г. Москва
Королев А. В. – д-р техн. наук, профессор, Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, г. Саратов
Красиков А. В. – д-р техн. наук, АО «Волжский трубный завод», г. Волжский Волгоградская обл.
Кудряков О. В. – д-р техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
Кузьмин С. В. – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград
Кураев А. А. – д-р физ.-мат. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь
Левашов Е. А. – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор НИТУ «МИСиС», г. Москва
Лысак В. И. – академик РАН, д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ, г. Волгоград
Макаров А. В. – академик РАН, Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
Максимов А. Л. – академик РАН, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, г. Москва
Малолетов А. В. – д-р физ.-мат. наук, профессор, Университет Иннополис, г. Иннополис, Республика Татарстан
Навроцкий А. В. – чл.-корр. РАН, д.х.н., профессор ВолгГТУ, г. Волгоград
Пай В. В. – д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск
Первухин Л. Б. – д-р техн. наук, ООО «Битруб Интернэшнл», г. Красноармейск, Московская обл.
Пустовойт В. Н. – д-р техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
Пышминцев И. Ю. – д-р техн. наук, доцент, Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск
Русинов В. Л. – чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор УрФУ, г. Екатеринбург
Трифонов А. А. – чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор, Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, г. Москва
Шолохов М. А. – д-р техн. наук, профессор, Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург
Шурыгин В. А. – академик РАН, д-р техн. наук, генеральный конструктор АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград

Серия
«ПРОГРЕССИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ»

ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Чигиринский Ю. Л., д.т.н., проф.
ВолГТУ

Носенко В. А., д.т.н., проф. ВПИ
(филиал) ВолГТУ (зам. науч. редак-
тора) (г. Волжский)

Ардашев Д. В., д.т.н., доцент ЮУрГУ
(НИУ) (г. Челябинск)

Багайсков Ю. С., д.т.н., проф. ВПИ
(филиал) ВолГТУ, (г. Волжский)

Бочкарев П. Ю., д.т.н., проф. КТИ
(филиал) ВолГТУ, (г. Камышин)

Братан С. М., д.т.н., проф. СевНТУ
(г. Севастополь)

Зубарев Ю. М., д.т.н., проф., ГУМРФ
им.адмирала С.О. Макарова
(г. Санкт-Петербург)

Ингеманссон А. Р., д.т.н., зам. ген.
директора – технический директор
АО «ФНПЦ «Гитан-Баррикады»
(г. Волгоград)

Крюков С. А., д.т.н., доцент ВПИ
(филиал) ВолГТУ (г. Волжский)

Сидякин Ю. И., д.т.н., проф. ВолГТУ
Тамаркин М. А., д.т.н., проф. ДГТУ
(г. Ростов-на-Дону)

Яковлев А. А., д.т.н., проф. ВолГТУ

Ответственный секретарь
Макарова О. А., к.т.н., доц.
Тел. 8-937-723-33-93

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
«Пресса России» – 80811
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/](https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

Тел. издательства ВолГТУ:
8-(8442) 24-84-05
8-(8442) 24-84-08
zavrio@vstu.ru

Научный журнал
Издается с января 2004 г.
Выходит двенадцать раз в год

№ 1 (308)

Январь

2026

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Адрес редакции:
Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: ianovakov@vstu.ru

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

*Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю,
на отдельные статьи – сохраняется за автором*

*Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного технического
университета» категорически запрещена без оформления договора
в соответствии с действующим законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского
государственного технического университета» обязательна*

Editor-in-Chief of the scientific journal "Izvestiya VSTU":

Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Dr. Sci. (Chemistry), VSTU

Editorial board:

Briskin E. S. – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., VSTU, Volgograd

Burinin A. A. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math), Institute of Machine Science and Metallurgy, Far Eastern Branch of the RAS, Komsomolsk-on-Amur

Vityaz P. A. – Academician of the NAS of Belarus, State Scientific Institution "Powder Metallurgy Institute", Minsk, Republic of Belarus

Golovanchikov A. B. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd

Zayakin O. V. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Institute of Metallurgy, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

Zlotin S. G. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the RAS, Moscow

Ivanov V. K. – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), N. S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow

Ingemansson A. R. – Dr. Sci. (Engineering), JSC "FSC "Titan-Barrikady", Volgograd

Kalita V. I. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow

Kobernik N. V. – Dr. Sci. (Engineering), Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Kolmakov A. G. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow

Korolev A. V. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Saratov State Technical University Ju. A. Gagarin, Saratov

Krasikov A. V. – Dr. Sci. (Engineering), Volzhsky Pipe Plant JSC, Volzhsky, Volgograd Region

Kudryakov O. V. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Don State Technical University, Rostov-on-Don

Kuzmin S. V. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd

Kuraev A. A. – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Levashov E. A. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Prof., NUST MISiS, Moscow

Lysak V. I. – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd

Makarov A. V. – Academician of the RAS, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

Maksimov A. L. – Academician of the RAS, A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the RAS, Moscow

Maloletov A. V. – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., Innopolis University, Innopolis, Republic of Tatarstan

Navrotsky A. V. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), Prof, VSTU, Volgograd

Pai V. V. – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk

Pervukhin L. B. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., "Bitrub International" LLC, Krasnoarmeysk, Moscow Region

Pustovoit V. N. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Don State Technical University, Rostov-on-Don

Pyshmintsev I. Yu. – Dr. Sci. (Engineering), Ass. Prof., Russian Scientific Research Institute of the Tube and Pipe Industries, Chelyabinsk

Rusinov V. L. – Corresponding Member of the RAS, Ph. Dr. Sci. (Chemistry), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg

Trifonov A. A. – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), Prof., A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the RAS, Moscow

Sholokhov M. A. – Dr. Sci. (Engineering), Prof. M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

Shurygin V. A. – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), JSC "FSC "Titan-Barrikady", Volgograd

SERIES
«ADVANCED
TECHNOLOGY IN
MACHINE BUILDING»

IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY

The Journal is included to the list of peer-reviewed scientific journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC) of the RF for publishing of results of candidates for scientific degrees

Editorial board:

Chairman

Tchigirinsky Ju.L., D. Sc.
(Engineering), Prof.

Nosenko V. A., D. Sc. (Engineering),
VPI (branch) VSTU (Deputy Scientific
Editor)

Ardashev D. V., D. Sc. (Engineering),
SUSU (National Research University)
Bagaiskov Yu. S., D. Sc. (Engineering),
VPI (branch) VSTU

Bochkarev P. Yu., D. Sc. (Engineering),
KTI (branch) VSTU

Bratan S. M., D. Sc. (Engineering),
(SEVSU, Sevastopol)

Zubarev Yu. M., D. Sc. (Engineering),
Admiral Makarov State University

Ingemansson A. R., D. Sc. (Engineering),
FRPC «Titan-Barricades» JSC

Kryukov S. A., D. Sc. (Engineering),
VPI (branch) VSTU

Sidyakin Yu. I., D. Sc. (Engineering),
VSTU

Tamarkin M. A., D. Sc. (Engineering),
DSTU

Yakovlev A. A., D. Sc. (Engineering),
VSTU

Executive secretary

Makarova O.A., Cand. Sc
Tel. 8-937-723-33-93

International index of the journal
ISSN 1990-5297.

The journal is distributed by sub-
scription.

Index of the magazine according to
the united catalog

«Press of Russia» – 80811.

[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

Tel. Of VSTU editorial office:

8-(8442) 24-84-05

8-(8442) 24-84-08

zavrio@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 1 (308)
January
2026

FOUNDER:

**FSBEI of Higher Professional Education
«Volgograd State Technical University»**

Editorial office address:

Volgograd, Lenin avenue, 28.

Tel.: Head Editor – (+7 8442) 24-80-00

E-mail: ianovakov@vstu.ru

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of Communication,
IT and Mass Communications (Roscomnadzor)

Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

Is printed according to the decision of editorial-review board of
Volgograd State Technical University

*The copyright for the journal in general belongs to the Founder,
for separate articles – to authors.*

*Reprint from the journal «Izvestia VSTU» is strongly forbidden without conclusion of an
agreement in accordance with the legislation of the RF
When reprinting the materials, the citation to the journal «Izvestia VSTU» is obligatory*

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абакумова С. Ю. 54
Антошин И. А. 58
Банников А. И. 7
Барабанов В. Г. 92
Бекренев Н. В. 32, 36
Бессонов Ф. А. 102
Бочкарев П. Ю. 11
Брунилина А. Р. 68
Гвинджилия В. Е. 14, 18
Голованчиков А. Б. 64, 102
Горшков Б. М. 23
Гришков А. Д. 42, 46
Дроботов А. В. 72, 88
Дуденков А. Ю. 97
Дудкина Н. Г. 68
Дьяченко Е. А. 92, 106
Залипаев П. П. 64
Залипаева О. А. 64
Зебазе Н. Ж. А. 27
Златкевич А. В. 7
Злобина И. В. 32, 36
Капарушкин С. 39
Кимбор Д. В. 72, 84
Князев Д. С. 76
Кожевникова А. А. 42, 46
Козенко М. Ю. 81
Курилов А. А. 84
Кухтик М. П. 50
Левковская А. А. 88
Макаров А. М. 76, 106
Макарова О. А. 7, 39
Малинин П. В. 11
Минаева А. Г. 54
Моисеев Д. В. 27
Ольштынский С. Н. 54
Порхун А. П. 81, 92
Поступаева С. Г. 64, 97
Приходькова И. В. 68
Прохоренко Н. А. 102
Русанов Д. А. 42, 46
Салех Ф. К. 50
Самохина Н. С. 23
Сидякин Ю. И. 54
Тришин Н. В. 106
Федорова К. Р. 42, 46
Чигиринский Ю. Л. 27
Шалухин Д. С. 106
Шумейко Л. М. 92
Яковлев А. А. 81, 97
Ярьсько С. И. 58

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Банников А. И., Златкевич А. В., Макарова О. А.</i> Модернизация системы автоматической правки шлифовального круга на станке ВЗ-290М.....	7
<i>Бочкарев П. Ю., Малинин П. В.</i> Развитие методических подходов технологического обеспечения операций проходного бесцентрового шлифования.....	11
<i>Гвинджилия В. Е.</i> Особенности потери устойчивости при точении валов малой жесткости.....	14
<i>Гвинджилия В. Е.</i> Влияние динамических свойств процесса резания на геометрические характеристики изготовления маложестких валов.....	18
<i>Горшков Б. М., Самохина Н. С.</i> Технологические методы повышения точности координатно-расточных станков.....	23
<i>Зебазе Н. Ж. А., Чигиринский Ю. Л., Моисеев Д. В.</i> Изменение теплофизических и механических свойств сталей при механической обработке.....	27
<i>Злобина И. В., Бекренев Н. В.</i> Повышение качества изделий из полимерных композиционных материалов путем введения финишной операции их СВЧ обработки.....	32
<i>Злобина И. В., Бекренев Н. В.</i> Применение диаграммы Парето для выбора параметров СВЧ упрочняющей обработки изделий из полимерных композиционных материалов.....	36
<i>Капарушкин С., Макарова О. А.</i> Рекомендации по улучшению системы менеджмента качества на предприятиях машиностроительной отрасли.....	39
<i>Кожевникова А. А., Федорова К. Р., Русанов Д. А., Гришков А. Д.</i> Универсальный ленточный конвейер для возможности непрерывной 3D-печати на FDM 3D-принтерах.....	42
<i>Кожевникова А. А., Федорова К. Р., Русанов Д. А., Гришков А. Д.</i> Сравнительный анализ прямолинейных, зубчатых и волнистых режущих сегментов.....	46
<i>Салех Ф. К., Кухтик М. П.</i> Испытания изгибной прочности зубчатых колес с армированием непрерывным углеволокном.....	50
<i>Сидякин Ю. И., Абакумова С. Ю., Ольштынский С. Н., Минаева А. Г.</i> Расчет интенсивности остаточных напряжений в задачах с упругопластическим контактом тел.....	54
<i>Яресько С. И., Антошин И. А.</i> Измерение пористости карбидовольфрамовых HVOF-покрытий после лазерной обработки.....	58

Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<i>Голованчиков А. Б., Залипаев П. П., Залипаева О. А., Поступаева С. Г.</i> Определение количества абсорбата в насыщенном абсорбенте при контроле параметров процесса.....	64
<i>Дудкина Н. Г., Приходькова И. В., Брунилина А. Р.</i> Применение автоматизированных программ в преподавании теории механизмов и машин на примере расчета параметров гайковырубного автомата.....	68
<i>Кимбор Д. В., Дроботов А. В.</i> Анализ современных гибридных производственных установок: совмещение 3D-печати и фрезерования.....	72
<i>Князев Д. С., Макаров А. М.</i> Анализ метода построения карт глубины на базе нейронной сети для ориентации колесного робота в пространстве.....	76
<i>Козенко М. Ю., Порхун А. П., Яковлев А. А.</i> Современное состояние ультразвуковой обработки в аддитивном производстве методом послонного наплавления.....	81
<i>Курилов А. А., Кимбор Д. В.</i> Разработка принципов калибровки пятиосевого 3D-принтера на основе тензодатчика.....	84
<i>Левковская А. А., Дроботов А. В.</i> Механизм автоматической смены оснований для печати в многоосевой аддитивной установке.....	88
<i>Порхун А. П., Шумейко Л. М., Барабанов В. Г., Дьяченко Е. А.</i> Роторная аддитивная установка, работающая по технологии FDM: принцип работы и перспективы использования.....	92
<i>Поступаева С. Г., Яковлев А. А., Дуденков А. Ю.</i> Система автоматического регулирования подачи двухкомпонентного СОТС для сверлильного станка.....	97
<i>Прохоренко Н. А., Голованчиков А. Б., Бессонов Ф. А.</i> Разработка автоматизированной тарельчатой ректификационной колонны с коррелирующими туннельными S-образными элементами.....	102
<i>Шалухин Д. С., Дьяченко Е. А., Макаров А. М., Тришин Н. В.</i> Назначение и особенности системы управления прямого отжига.....	106

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.774.352: 621.93.024.74
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-7-10

Научная статья
Original article

А. И. Банников, А. В. Златкевич, О. А. Макарова

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПРАВКИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА НА СТАНКЕ ВЗ-290М

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Александр Владимирович Златкевич, rabota.rab2510@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты работ по модернизации системы автоматической правки шлифовального круга на станке ВЗ-290М. Рассмотрены проблемы, связанные с износом механизмов после длительной эксплуатации: выход из строя направляющих, червячной пары, подшипников и возникновение биения шпинделя. Предложен комплекс решений, включающий замену изношенных компонентов, разработку нового алмазодержателя, оптимизацию профиля зуба пильного диска с переходом на передний угол, близкий к нулю, и применение специальных кулаков-эксцентров для настройки заточного станка.

Ключевые слова: шлифовальный круг, автоматическая правка, модернизация, алмазный карандаш, стойкость инструмента, профиль зуба, биение, кулаки-эксцентры

Для цитирования: Банников А. И., Златкевич А. В., Макарова О. А. Модернизация системы автоматической правки шлифовального круга на станке ВЗ-290М. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 7–10. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-7-10

Информация об авторах:

Александр Иванович Банников – профессор, д-р техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ
orcid.org/0000-0003-4655-3981
e-mail: Alc19@mail.ru

Александр Владимирович Златкевич – аспирант кафедры ТМС, ВолгГТУ
e-mail: Alexandr25109@gmail.com

Ольга Александровна Макарова – доцент, канд. техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ
orcid.org/0000-0003-2672-136x
e-mail: olgamakarova5024@gmail.com

Вклад авторов:

А. И. Банников – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

А. В. Златкевич – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

О. А. Макарова – определение цели работы, составление статьи, участие в обсуждении результатов.

A. I. Bannikov, A. V. Zlatkevich, O. A. Makarova

MODERNIZATION OF THE AUTOMATIC REPAIR SYSTEM OF THE GRINDING CIRCLE ON THE VZ-290M MACHINEENGINEERING INDUSTRY

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Alexandr V. Zlatkevich, rabota.rab2510@gmail.com

Abstract. The article presents the results of modernization of the automatic grinding wheel dressing system on the VZ-290M machine. The problems associated with the wear of mechanisms after long-term operation are considered: failure of guides, worm gear, bearings, and spindle runout. A set of solutions is proposed, including replacement of worn components, development of a new diamond holder, optimization of the saw tooth profile with a transition to a rake angle close to zero, and the use of special cam-eccentrics for setting up the sharpening machine.

Keywords: grinding wheel, automatic dressing, modernization, diamond pencil, tool life, tooth profile, runout, cam-eccentrics

For citation: Bannikov A. I., Zlatkevich A. V., Makarova O. A. Modernization of the automatic straightening system of the grinding wheel on the VZ-290M machine. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 7–10. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-7-10

Information about the authors:

Alexandr I. Bannikov – Professor, doctor of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

orcid.org/0000-0003-4655-3981

e-mail: Alc19@mail.ru

Alexandr V. Zlatkevich – Postgraduate student Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: Alexandr25109@gmail.com

Olga A. Makarova – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

orcid.org/0000-0003-2672-136x

e-mail: olgamakarova5024@gmail.com

Contribution of the authors:

Alexandr I. Bannikov – determined the purpose of the work, participated in the discussion of the results.

Alexandr V. Zlatkevich – processing and analysis of research results, writing the text of the article

Olga A. Makarova – determined the purpose of the work, writing an article, participated in the discussion of the results.

Введение

Эффективность процесса резки металлопродукта дисковыми пилами в значительной степени определяется точностью заточки их режущей кромки, которая, в свою очередь, напрямую зависит от состояния и точности работы оборудования для правки шлифовальных кругов. На многих предприятиях эксплуатируется устаревшее оборудование, такое как станок ВЗ-290М, чьи системы автоматической правки после многолетней работы теряют точность. Это приводит к некорректному профилированию круга и, как следствие, – к заточке пильных дисков с нарушенной геометрией зуба. Неоптимальная геометрия вызывает повышенные усилия резания, ускоренный износ и частую замену дорогостоящих дисков, увеличивая себестоимость продукции.

Целью данной работы являлась модернизация системы автоматической правки шлифовального круга станка ВЗ-290М не просто для восстановления ее функций, а для достижения принципиально нового качества заточки пильных дисков, выражающегося в максимальном увеличении их стойкости. Задачи исследования включали: диагностику изношенных узлов системы правки, разработку и внедрение конструктивных улучшений, оптимизацию профиля зуба пильного диска и экспериментальную оценку эффективности проведенных мероприятий по конечному показателю – ресурсу пильного инструмента.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служил станок ВЗ-290М с механизмом автоматической алмазной правки шлифовального круга, используемого для заточки пильных дисков. Методами визуально-измерительного контроля был выявлен критический износ ключевых компонентов: перпендикулярных направляющих (радиальное и торцевое биение 1–1,5 мм), червячной пары привода и подшипниковых узлов, что являлось первопричиной низкого качества правки.

Для обеспечения стабильности и качества заточки пильных дисков была проведена замена изношенных узлов станка: перпендикулярных направляющих (верхних и нижних) и червячной пары. Для восстановления шпиндельного узла и устранения биения заменены подшипники. Была проведена модернизация механизма правки: разработан и изготовлен новый алмазодержатель из стали 40Х с термообработкой.

Ключевым конструктивным решением стала оптимизация профиля зуба. Вместо традиционного одноугольного профиля зуба с нулевым передним углом (рис. 1, а, в) был внедрен криволинейный профиль с отрицательным передним углом $\gamma = -10^\circ$ (рис. 1, б, г). Это позволило снизить износ зубьев и повысить прочность зуба при ударных нагрузках.

Для обеспечения воспроизводимости профиля при заточке использовался дополнительный комплект кулаков-эксцентров (рис. 2).

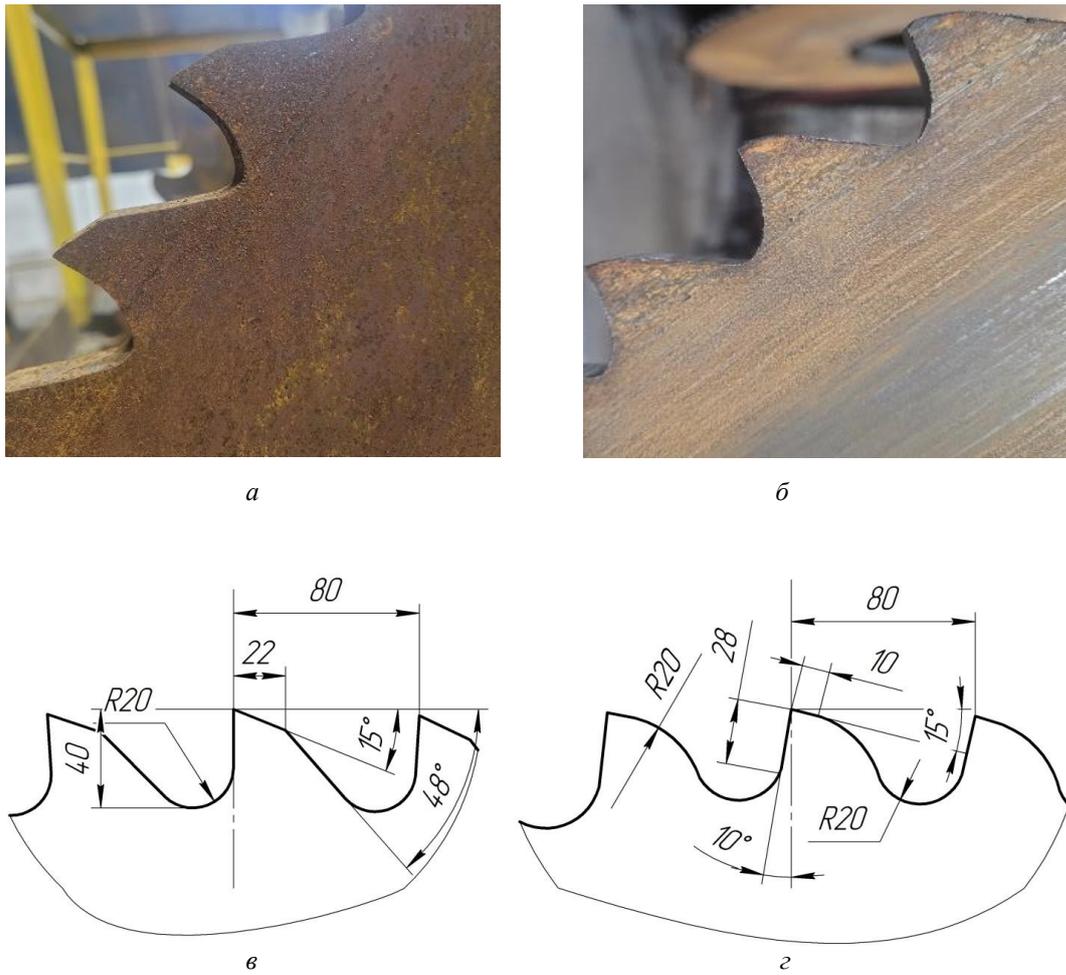


Рис. 1. Одноугловой профиль (а, в) и модифицированный профиль зуба (б, г)



Рис. 2. Комплект кулаков-эксцентров

Испытания включали контроль точности позиционирования алмаза, замеры радиального биения шлифовального круга, оценку стойкости инструмента и качества поверхности. Все измерения проводились при стабильных режимах обработки.

Результаты исследования и их обсуждение

Восстановление точности системы правки позволило получить стабильно высокое качество шлифовального круга: радиальное биение было снижено с 1,5 до 0,05 мм, а точность

позиционирования алмаза улучшена на 87 %. Это создало необходимую базу для точного формирования режущей кромки на пильных дисках.

Наиболее значимые результаты были получены при оценке эксплуатационных показателей самих пильных дисков. Ключевым критерием эффективности модернизации выступило снижение удельного расхода инструмента. Как наглядно демонстрирует рис. 3, после проведения работ удельный расход пильных дисков сократился с 0,32 до 0,06 шт. на 1000 тонн проката. Данное снижение на 81 % является прямым следствием оптимизации геометрии зуба и повышения качества его заточки.

Кроме того, были зафиксированы следующие улучшения:

- увеличение ресурса. Количество циклов переточки одного диска возросло с 3 до 7, что дополнительно снижает инструментальные затраты;

- улучшение качества реза. Шероховатость поверхности реза после использования дисков, заточенных по новой технологии, снизилась с Ra 1,6 до Ra 0,8 мкм;

- сопутствующие эффекты. Зафиксировано снижение энергопотребления станка на 18 % и уровня вибраций на 27 %, что объясняется снижением усилия резания благодаря новой геометрии зуба.

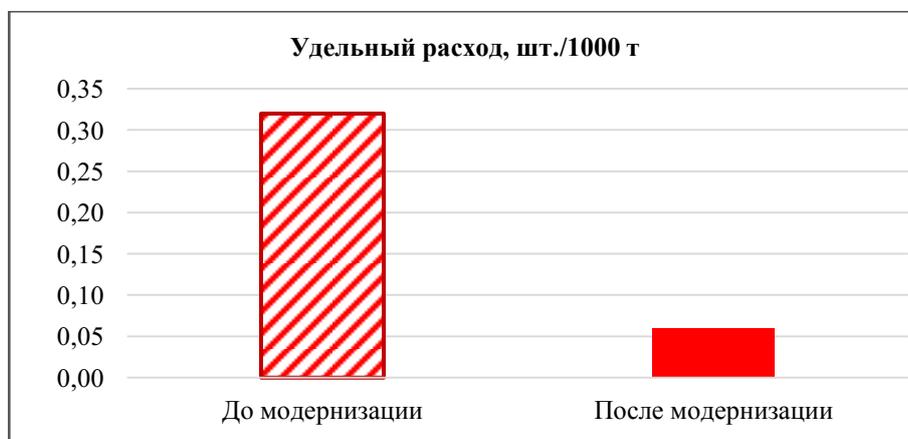


Рис. 3. Удельный расход пильных дисков до и после модернизации системы автоматической правки шлифовального круга

Выводы

1. Проведенная модернизация системы автоматической правки шлифовального круга на станке ВЗ-290М доказала свою высокую эффективность, выраженную не в локальных параметрах оборудования, а в кардинальном повышении стойкости (на 81 %) и ресурса пильных дисков.

2. Ключевым фактором успеха стала комплексность подхода: восстановление механической точности системы правки позволило реализовать оптимальную геометрию резания (криволинейный профиль зуба с отрицательным передним углом), воспроизводимую с помощью кулаков-эксцентров.

3. Полученные результаты позволяют рекомендовать данный подход для внедрения на дру-

гих предприятиях, использующих абразивную заточку режущего инструмента, в качестве методики целенаправленного улучшения эксплуатационных характеристик конечного инструмента через контроль состояния и параметров оборудования для его обслуживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по эксплуатации станка ВЗ-290М.
2. Слепышкова, Д. В. Повышение эффективности горячей резки проката за счет модификации режущей части пилы / Д. В. Слепышкова, А. И. Банников // Тезисы докладов смотря-конкурса науч., констр. и техн. работ студентов ВолгГТУ. – Волгоград : ВолгГТУ, 2011. – С. 27.
3. Современные технологии абразивной обработки / под ред. И. А. Винера. – М. : Машиностроение, 2018. – 456 с.

УДК 621.923
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-11-14

Научная статья
Original article

П. Ю. Бочкарев, П. В. Малинин

**РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ
ПРОХОДНОГО БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ**

**Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета, Камышин, Россия**

✉ Петр Юрьевич Бочкарев, bpy@mail.ru

Аннотация. Технология бесцентрового шлифования благодаря своим уникальным техническим характеристикам и высокой эффективности занимает особое место в современной металлообработке. Бесцентровое шлифование, несмотря на свои очевидные преимущества, демонстрирует ограниченную область применения, что обусловлено сложностью настройки оборудования, связанной с отсутствием стандартизированных процедур и формализованных методик. В работе методы бесцентрового шлифования классифицированы в соответствии с возможными схемами обработки на основе выявления сходства технологических параметров, а также состояния оборудования и инструментов. Оценка адекватности настройки технологического оборудования предлагается проводить с использованием выведенных зависимостей, которые позволяют анализировать характер взаимодействия поверхности детали с элементами технологической системы. Экспериментальным путем установлена значимость критерия силового замыкания как одного из определяющих факторов качества функционирования. Разработка комплекса математических моделей, алгоритмов и прикладного программного обеспечения способствует расширению научно-методического фундамента для построения САПР-систем, ориентированных на процессы бесцентрового шлифования. Результаты проведенных на производственных площадках теоретических и практических изысканий верифицировали корректность предложенных решений, подтвердив обеспечение стабильного качества продукции и сокращение трудоемкости работ по наладке.

Ключевые слова: технологическая подготовка; бесцентровое шлифование; проектные процедуры; наладка оборудования; силовое замыкание

Для цитирования: Бочкарев П. Ю., Малинин П. В. Развитие методических подходов технологического обеспечения операций проходного бесцентрового шлифования. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 11–14. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-11-14

Информация об авторах:

Петр Юрьевич Бочкарев – профессор, д-р техн. наук, кафедра ТМС, Камышинский технологический институт (филиал ВолгГТУ)

РИНЦ AuthorID: 118281

e-mail: bpy@mail.ru

Павел Витальевич Малинин – аспирант кафедры ТМС, Камышинский технологический институт (филиал ВолгГТУ)

РИНЦ AuthorID: 788880

e-mail: mpv92@yandex.ru

Вклад авторов:

П. Ю. Бочкарев – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

П. В. Малинин – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

P. Yu. Bochkarev, P. V. Malinin

**DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL APPROACHES
FOR TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THROUGH-FEED
CENTERLESS GRINDING OPERATIONS**

**Kamyshin Technological Institute (branch)
of Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia**

✉ Peter Yu. Bochkarev, bpy@mail.ru

Abstract. The technology of centerless grinding, due to its unique technical characteristics and high efficiency, occupies a special place in modern metalworking. Centerless grinding, despite its obvious advantages, demonstrates a limited scope of application, due to the complexity of setting up and fine-tuning equipment due to the lack of standardized procedures and formalized techniques. In this paper, centerless grinding methods are classified accord-

ing to possible processing schemes based on the identification of similarities in technological parameters, as well as the condition of equipment and tools. It is proposed to evaluate the adequacy of the technological equipment settings using the derived dependencies, which allow analyzing the nature of the interaction of the surface of the part with the elements of the technological system. The significance of the power short circuit criterion as one of the determining factors of the quality of functioning has been experimentally established. The development of a complex of mathematical models, algorithms, and applied software contributes to the expansion of the scientific and methodological foundation for building CAD systems focused on centerless grinding processes. The results of the theoretical and practical investigations carried out at the production sites verified the correctness of the proposed solutions, confirming the stable quality of products and reducing the complexity of the adjustment work.

Keywords: technological preparation; centerless grinding; design procedures; equipment setup; power closure

For citation: Bochkarev P. Yu., Malinin P. V. Development of methodological approaches for technological support of through-feed centerless grinding operations. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 11–14. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-11-14

Information about the authors:

Peter Yu. Bochkarev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of TMS, Kamyshinsky Institute of Technology (branch of VSTU)

RSCI AuthorID: 118281

e-mail: bpy@mail.ru

Pavel V. Malinin – Postgraduate student of the Department of TMS, Kamyshinsky Institute of Technology (branch of VSTU)

RSCI AuthorID: 788880

e-mail: mpv92@yandex.ru

Contribution of the authors:

Peter Yu. Bochkarev – defining the purpose of the work, participating in the discussion of the results.

Pavel V. Malinin – processing and analysis of research results, writing the text of the article.

Введение

Современные производственные системы нацелены на радикальное повышение производительности при гарантированном соблюдении заданных конструкторских требований. Достижение этих целей определяется грамотным подбором способов обработки поверхностей при разработке технологического процесса [1–3]. Среди методов обработки цилиндрических поверхностей лидирующие позиции занимает бесцентровое шлифование, считающееся наиболее перспективным направлением. Данная технология уже доказала свою высокую эффективность в ряде машиностроительных отраслей, например, в производстве подшипников [4, 5]. Однако ее повсеместному внедрению препятствует недостаточная научная и методическая база в сфере технологической подготовки.

Целью работы является создание универсальной концепции формализованного описания процесса технологической подготовки операций бесцентрового шлифования, что должно служить основой для создания систем автоматизации выполнения проектных процедур проектирования и реализации технологических процессов, осуществляемых с использованием бесцентрово-шлифовального оборудования.

Методика проведения исследования

Исследования включали последовательное решение следующих научных задач: классификация методов бесцентровой шлифовальной обработки; формирование множества методов однородных по выполнению проектных процедур разработки технологических операций в кластер; разработка для них формализованных моделей определения мест контакта обрабатываемых поверхностей с элементами технологической системы; создание методики построения силовой схемы процесса обработки.

Для реализации процедуры группировки методов бесцентрового шлифования была проведена классификация на основе условно независимых областей, охватывающих технологические аспекты подготовки производства. Итогом стала автоматическая классификация, результаты которой визуализированы в форме дендрограмм, построенных на базе матриц различий [6]. Практическая значимость результатов проведенных исследований заключается в том, что они предоставляют возможность адаптировать разнообразные методы бесцентрового шлифования к специфическим этапам технологической подготовки производства, включающая в себя определение параметров

обработки, которые обеспечивают достижение заданных качественных характеристик обрабатываемой поверхности.

Полученные для сформированных групп математические модели [7] дают возможность формализовать назначение настроечных параметров для операций проходного бесцентрового шлифования, принимая в расчет актуальное состояние технологической системы и характеристики обрабатываемой заготовки. Их ключевым преимуществом является адаптивность под конструктивные особенности конкретного станка, что упрощает практическое применение и возможность для объективного мониторинга в ходе настройки. В работе [8] описаны модели для определения пространственно-размерных параметров процесса, которые, с учетом конструктивных свойств оборудования и оснастки, позволяют для любого поперечного сечения в зоне обработки рассчитать комплекс геометрических характеристик. Среди них: углы наклона линий от центра заготовки к центрам кругов, угол между этими линиями, межосевое расстояние в вертикальной плоскости, а также расстояние от центра заготовки до горизонтальных линий, проходящих через центры кругов, и до прямой, их соединяющей. Кроме того, модели определяют координаты точки контакта заготовки с опорным ножом.

Для верификации соблюдения условия силового замыкания по всей рабочей зоне при проходном бесцентровом шлифовании был предложен метод, основанный на анализе расположения точек контакта в поперечном сечении. Соблюдение условия силового замыкания служит ключевым количественным критерием, позволяющим оценить корректность выбранных технологических решений. Для автоматизации данной оценки были разработаны специализированная модель, вычислительный алгоритм и программный модуль, которые анализируют положение точек контакта заготовки с элементами оснастки при настройке оборудования.

Дальнейшим развитием этого подхода стала разработка комплексной силовой модели, учитывающей взаимное влияние усилий, возникающих в зонах контакта заготовки с компонентами технологической системы [9]. Данная методика предусматривает детальный анализ составляющих сил, действующих в каждом месте контакта. Теоретическую основу данного подхода составили принципы, описанные в ра-

боте [10], что обеспечивает обоснованность и достоверность выполненных расчетов. В сочетании с ранее выполненными исследованиями, направленными на выявление мест контакта обрабатываемой поверхности с технологическими компонентами оборудования, полученные выражения позволяют создать более точную модель системы сил, приложенных к обрабатываемой поверхности детали, обеспечивающих создание методики расчета сил, возникающих в процессе бесцентрового шлифования.

Результаты исследования

На основе проведенных исследований был предложен метод, позволивший создать качественно новую универсальную математическую модель. Ее ключевое преимущество перед известными аналогами заключается в способности проводить комплексный анализ сил резания и динамики взаимодействия между заготовкой и элементами технологической системы в процессе бесцентрового шлифования. Данная модель обеспечивает полную формализацию технологической подготовки для операций проходного шлифования. Центральной идеей подхода является углубленное изучение сложных взаимосвязанных динамических процессов, сопровождающих обработку.

Обсуждение результатов

Научной новизной работы является полученный комплекс теоретических зависимостей, позволяющих с учетом реального состояния оборудования и средств технологического оснащения определить пространственные и силовые взаимосвязи возникающих в процессе обработки деталей на операциях проходного бесцентрового шлифования.

Выполненная проверка предлагаемых методических подходов к технологическому обеспечению операций проходного бесцентрового шлифования выполнялась в производственных условиях изготовления деталей на станках Sasl 200*500: «Кольцо наружное» подшипника 6-170314Ш1.01 ГОСТ 520-2011, «Ролик 42926 04 (EN 12080) в условиях АО «ЕПК Саратов», и подтвердила их работоспособность.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что все рассматриваемые параметры находятся в тесной взаимосвязи, и подтверждают необходимость разработки комплексного подхода к определению параметров настройки и реализации операций бесцентрового шлифования, обеспечивающих технологическое со-

проведение процессов подготовки производства деталей.

Выводы

В работе представлено решение ряда ключевых научных задач, охватывающих фундаментальные аспекты бесцентровой шлифовальной обработки. Осуществлена детальная классификация методов бесцентрового шлифования, что позволило структурировать существующие подходы к выполнению данных операций. Создана методика, позволяющая осуществлять комплексный анализ силовых взаимодействий в процессе обработки, что является критически важным для повышения эффективности и качества производственных операций. Теоретические и экспериментальные результаты работы не только расширяют фундаментальные знания о процессе, но и служат основой для разработки систем автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов для данного оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Сулова. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
2. Чигиринский, Ю. Л. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Е. М. Фролов // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 39–48.

3. Ингеманссон, А. Р. Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки / А. Р. Ингеманссон // Известия ВолгГТУ : № 1 (248) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 15–18.

4. Муцяно, В. И. Бесцентровое шлифование / В. И. Муцяно, А. Я. Брагчиков. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 96 с.

5. Ашкиназий, Я. М. Бесцентровые шлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка / Я. М. Ашкиназий. – М. : Машиностроение, 2003. – 352 с.: ил.

6. Малинин, П. В. Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 36–39.

7. Обоснование параметров наладки операций проходного бесцентрового шлифования / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, И. И. Артемов, М. О. Гончаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2024. – № 3(71). – С. 142–156.

8. Малинин, П. В. Оценка условия силового замыкания при наладке операций проходного бесцентрового шлифования / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, И. И. Артемов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2024. – № 4 (72). – С. 109–117.

9. Малинин, П. В. Взаимосвязанность сил при проходном бесцентровом шлифовании / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, И. И. Артемов, М. О. Гончаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2023. – № 4.

10. Душко, О. В. Эффективность импрегнированного абразивного инструмента при обработке деталей подшипников / О. В. Душко, С. А. Крюков // Научные технологии в машиностроении. – 2025. – № 4. – С. 17–23.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 621.9:531.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-14-18

Научная статья

Original article

В. Е. Гвинджилия

ОСОБЕННОСТИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ВАЛОВ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

✉ Валерия Енвериевна Гвинджилия, vgvindjiliya@donstu.ru

Аннотация. В работе представлено моделирование динамики точения с учетом зависимости жесткости заготовки от положения инструмента вдоль ее оси. Основное внимание уделено устойчивости равновесия в подвижной системе координат, траектория которой определяется движением исполнительных элементов. Приведены результаты математического моделирования устойчивости упругих деформаций, и раскрыты особенности анализа устойчивости динамики процесса резания с переменными вдоль траектории матрицами жесткости.

Ключевые слова: динамическая система резания, устойчивость, обработка валов малой жесткости

Финансирование. Работа проведена в рамках выполнения соглашения от 29.10.2025 года № 075-03-2025-302/8 на реализацию ПНИ «Разработка программно-аппаратных средств для мониторинга и анализа параметров резания и эксплуатационных характеристик станков с ЧПУ» (FZNE-2025-0008).

Для цитирования: Гвинджилия В. Е. Особенности потери устойчивости при точении валов малой жесткости. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 14–18. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-14-18

Информация об авторах:

Валерия Энвериевна Гвинджилия – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП, Донской государствен-
ный технический университет
orcid.org/0000-0003-1066-4604
e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

Вклад авторов:

В. Е. Гвинджилия – определение цели работы, написание статьи.

V. E. Gvindjiliya

FEATURES OF STABILITY LOSS IN THE TURNING OF LOW-RIGIDITY SHAFTS

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

✉ Valeria E. Gvindzhilia, vvgvindjiliya@donstu.ru

Abstract. This paper presents a dynamic model of the turning process that accounts for the dependence of workpiece stiffness on the tool position along its axis. The primary focus is on the stability of equilibrium in a moving coordinate system, whose trajectory is defined by the motion of the actuating elements. The results of a mathematical simulation of the stability of elastic deformations are presented, and the specifics of analyzing the stability of the cutting process dynamics with stiffness matrices variable along the trajectory are discussed.

Keywords: dynamic cutting system, low rigidity workpiece, stability

Financing. The work was carried out as part of the implementation of agreement No. 075-03-2025-302/8 dated 10/29/2025 for the implementation of the research project "Development of software and hardware for monitoring and analyzing cutting parameters and performance characteristics of CNC machines" (FZNE-2025-0008).

For citation: Gvindzhilia V. E. Features of stability loss when turning of low rigidity shafts. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 14–18. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-14-18

Information about the authors:

Valeria E. Gvindzhilia – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Department of Automation of Manufacturing Processes, Don State Technical University
orcid.org/0000-0003-1066-4604
e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

Contribution of the authors:

Valeria E. Gvindzhilia – defining the purpose of the work, writing the article.

Введение

Работа развивает методику синтеза управляющих программ, адаптированных к переменной вдоль оси жесткости заготовки [1]. Актуальность задачи обусловлена сложностями обработки маложестких валов, где пространственное изменение параметров и свойств динамической системы резания (ДСР) существенно влияет на устойчивость упругих деформаций.

Современные модели динамики резания [3–8] описывают силы через координаты состояния ДСР. Они позволяют оценить динамику систему при потере устойчивости на основе анализа механизма формирования различных аттракторов деформаций (предельные циклы, торы, хаотические режимы) [7–10]. Однако они не учитывают пространственного изменения свойств заготовки, в частности, жесткости.

Настоящее исследование восполняет этот недостаток и направлено на раскрытие особенностей потери устойчивости равновесия ДСР с учетом переменной траектории жесткости вдоль обрабатываемой заготовки. Показана необходимость дополнения алгоритмов синтеза программ ЧПУ анализом устойчивости вычисленных траекторий, как ключевого условия их реализации в качестве аттракторов.

Материалы и методы исследования

Ранее [1] рассмотрена проблема вычисления ТИЭС, определяемых программой ЧПУ, при которых геометрическая погрешность изготовления валов малой жесткости удовлетворяет заданным требованиям. На основе приведенного в этой статье материала можно определить следующее уравнение динамики процесса резания

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2 Z}{dt^2} + h \frac{dZ}{dt} + cZ = F; \dots \dots \dots "a" \\ T^{(0)} \frac{dF^{(0)}(t)}{dt} + F^{(0)}(t) = \rho \{1 + \mu \exp[-\zeta(V_3 - v_3 - v_5)]\} [t_P^{(0)} - Z_1 - Z_4] \int_{t-T}^t \{V_2(\xi) - v_2(\xi)\} d\xi, \dots "b" \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $\mathbf{Z} = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5\}^T = \{X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_3\}^T$; $\mathbf{F} = F^{(0)} \{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_1, \chi_3\}^T$; $T^{(0)}$ – постоянная времени стружкообразования, с; ρ – давление стружки, кг/мм²; ζ – коэффициент наклона, с/мм; $T = (\Omega)^{-1}$ – время оборота, с; μ – безразмерный коэффициент. В (2) обозначено $dZ_i/dt = v_i$, $i = 1, 2, \dots, 5$. Вид суммарных матриц размерно-

стью (5×5) инерционных скоростных и упругих коэффициентов представлен в [10]. При анализе устойчивости необходимо определить точки равновесия $\mathbf{Z}^*(L_2) = \{Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_5^*\}^T \in \mathfrak{R}_Z^{(5)}$, вычислить уравнение в вариациях относительно этих точек и его линеаризовать [12]

Тогда имеем линеаризованное уравнение в вариациях:

$$\begin{cases} \mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{z}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{z}}{dt} + \mathbf{c}\mathbf{z} = \mathbf{f}; \\ T^{(0)} \frac{df^{(0)}(t)}{dt} + f^{(0)}(t) = \rho \{-[1 + \mu \exp(-\zeta(V_3))] [t_P^* \delta z_2 + S_P^{(0)}(z_1 + z_4)] + \\ + \mu \zeta \exp(-\zeta V_3) t_P^{(*)} S_P^{(0)}(v_2 + v_5)\}, \end{cases} \quad (2)$$

где $t_P^* = t_P^{(0)} - Z_1^* - Z_4^*$; $\delta z_2 = z_2(t) - z_2(t - T)$. При определении этого уравнения отброшены все малые мультипликативные члены, а экспоненциальная функция представлена в виде ряда Тейлора с отбрасыванием всех членов, начиная с квадратичного. Анализ (2) показывает, что можно выделить превалирующий канал, влияющий на самовозбуждение ДСР. Он формируется через текущее значение глубины резания, которая на порядок больше, чем канал, формируемый через величину подачи. К тому же эта связь, зависящая от параметра t_P^* , дополнительно может учитывать процесс регенеративного самовозбуждения [7–10].

Анализ результатов

Приведем пример изменения устойчивости при варьировании начального значения глубины $t_P^{(0)} = 0,5(d - D)$ в точке $L_2(0)$. Коэффициент усиления K_P этой связи, формируемый процессом резания, равен $\rho t_P^* [1 + \mu \exp(-\zeta(V_3))]$. А на общее самовозбуждение системы еще влияет податливость в направлениях Z_1^* и Z_4^* . Параметр ρ зависит от износа инструмента и при постоянном износе и скорости резания он остается неизменным. Однако параметр K_P принципиально зависит от $t_P^* = t_P^{(0)} - Z_1^* - Z_4^*$, то есть он уменьшается при увеличении податливости подсистемы заготовки. Эта зависимость позволяет объяснить приведенный ниже пример изменения свойств траекторий инстру-

мента при его перемещении вдоль оси обрабатываемой заготовки (рис. 1).

На примере показано, что даже относительно небольшое увеличение глубины резания с $t_P^{(0)} = 1,0$ мм до $t_P^{(0)} = 1,5$ мм приводит к заметному изменению динамических свойств системы. В частности, устойчивость медленно сдвигающегося равновесия системы обладает высокой чувствительностью к вариациям технологических режимов. Именно этим объясняется anomalous поведение устойчивости вдоль траектории L_2 на участке «В-С» при увеличении податливости равновесие упругих деформаций становится устойчивым (рис. 1, б). Причем, потеря устойчивости обладает высокой чувствительностью к малым вариациям технологических режимов, установленных по программе ЧПУ. Поэтому при выборе технологических режимов, обеспечивающих постоянство упругих деформаций, и, следовательно, диаметра вала необходимо дополнительно обеспечивать устойчивость программируемых траекторий.

Кроме этого, параметры $T^{(0)}$ и ρ в (2) по мере развития износа инструмента изменяются и влияют на устойчивость ДСР. Причем, увеличение ρ всегда способствует потере устойчивости, а $T^{(0)}$ оказывает противоречивое влияние на устойчивость равновесия формообразующих траекторий [9–12].

Каждой траектории формообразования соответствует уникальное отображение погрешности Δd в скелетной топологии, что приводит к пространственно-временному изменению поверхностного рельефа (рис. 2).

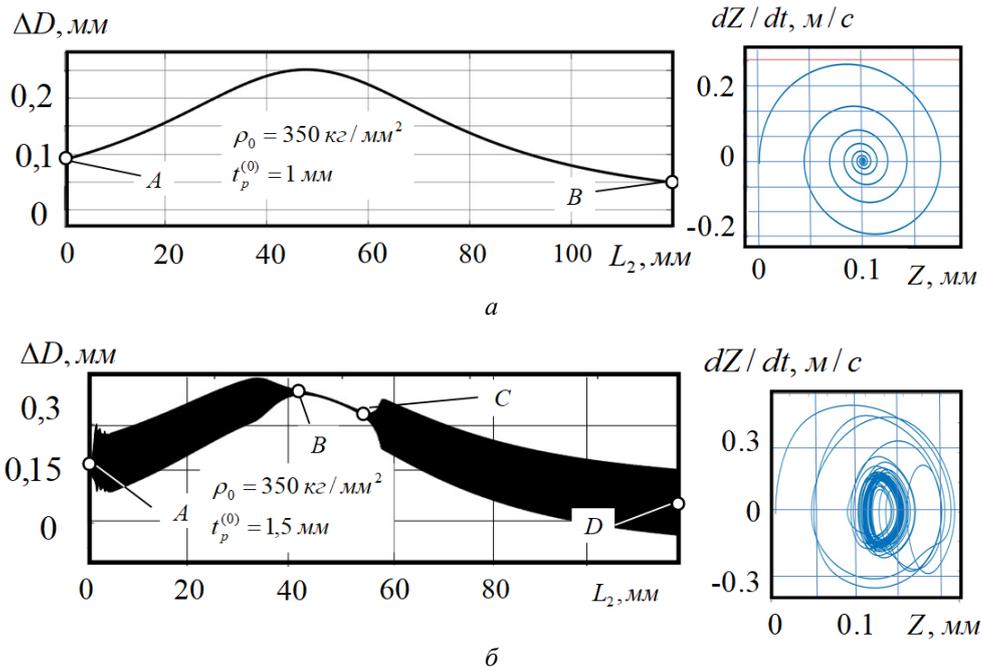


Рис. 1. Пример изменения траектории деформационных смещений вдоль оси L_2 при варьировании глубины $t_p^{(0)}$:
 $a - t_p^{(0)} = 1,0 \text{ мм}$; $b - t_p^{(0)} = 1,5 \text{ мм}$

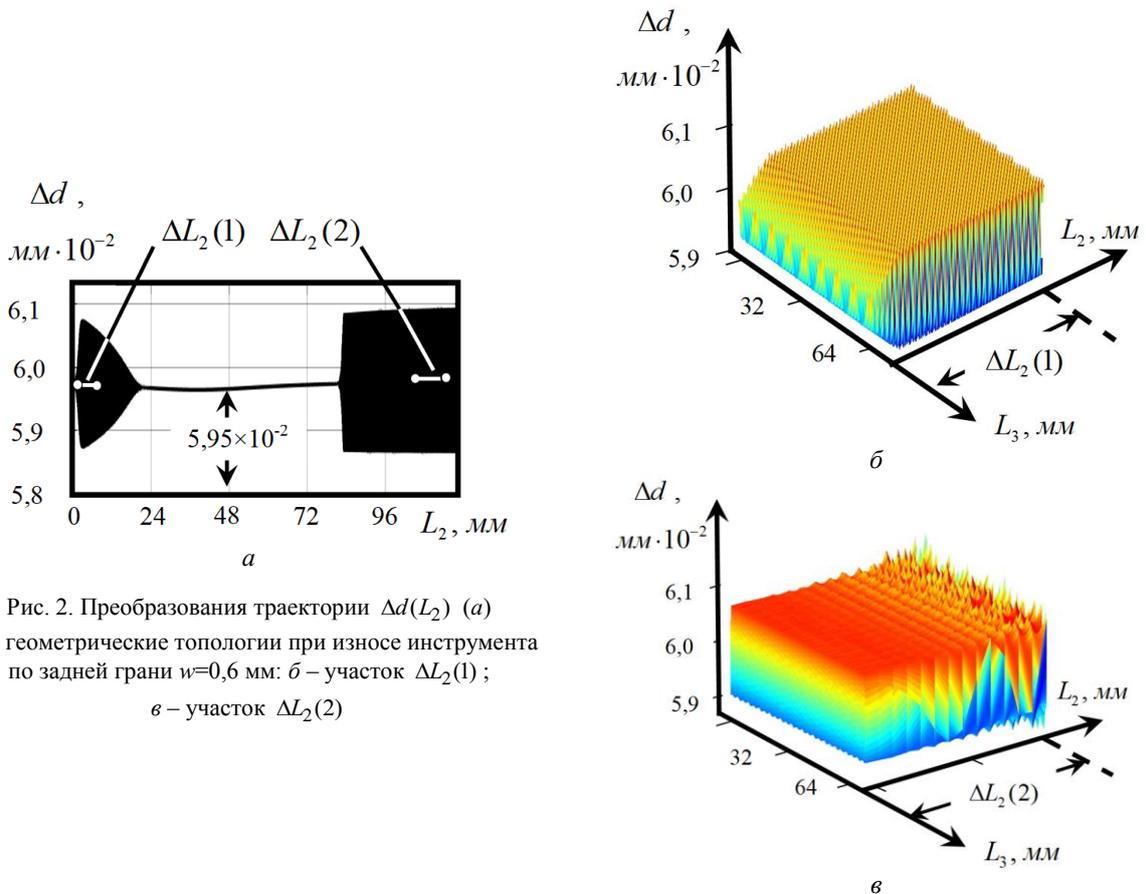


Рис. 2. Преобразования траектории $\Delta d(L_2)$ (a) и ее геометрические топологии при износе инструмента по задней грани $w=0,6 \text{ мм}$: б – участок $\Delta L_2(1)$; в – участок $\Delta L_2(2)$

Обработка валов с пространственно-изменяемой жесткостью приводит к вариациям диа-

метра и рельефа поверхности. Установлено, что при постоянных режущих свойствах инстру-

мента устойчивость процесса и тип аттракторов деформаций зависят от положения точки равновесия вдоль оси. Стабилизация упругих деформаций обеспечивает инвариантность динамических свойств системы вдоль траектории, что подтверждено экспериментально и методами цифрового моделирования.

Заключение

Во многих практически важных случаях при изготовлении деталей на станках с ЧПУ имеется априорно заданная информация, об изменении динамических свойств обрабатываемой детали вдоль траектории перемещения инструмента. Типичным примером такой детали является вал малой жесткости, значение которой изменяется по заданному закону. Приведенный в статье математический инструментарий и выполненные цифровые исследования, определили новое направление повышения производительности на основе согласования программы ЧПУ с априорно заданным законом изменения свойств системы.

Выполненные исследования раскрыли не анализируемые ранее свойства устойчивости стационарных траекторий, обеспечивающих условие согласования упругих свойств заготовки с траекториями исполнительных элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Амирджанова, И. Ю.* Система автоматического управления процессом обработки нежестких деталей / И. Ю. Амирджанова, О. И. Драчев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (267) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 13–16.
2. *Соломенцев, Ю. М.* Адаптивное управление технологическими процессами / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, П. Протопопов, И. М. Рыбкин, В. А. Тимирязев. – Москва : Машиностроение, 1980. – 555 с.
3. *Лапшин, В. П.* Об одном частном случае синтеза системы управления процессом обработки металлов точением / Т. С. Бабенко, В. В. Христофорова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – 17(1). – С. 75–84.
4. *Kabaldin, Yu. G.* Development of digital twin of CNC unit based on machine learning methods / D. A. Shatagin, M. S. Anosov, A. M. Kuzmishina // Vestnik of Don State Technical University. – 2019. – 19(1). – P. 45–55.
5. *Gousskov, A. M.* Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A. M. Gousskov, S. A. Voronov, H. Paris, S. A. Batzer // Commun. Nonlin. Sci. Numer. Simul. – 2002. – Vol. 7. – P. 207–221.
6. *Litak, G.* Chaotic vibrations in a regenerative cutting process / G. Litak // Chaos, Solitons & Fractals. – 2002. – Vol. 13. – P. 1531–1535.
7. *Stepan, G.* Nonlinear dynamics of high-speed milling subjected to regenerative effect / G. Stepan, R. Szalai, T. Insperger // Nonlinear Dynamics of Production Systems / eds. G. Radons, R. Neugebauer. – 2004. – P. 111–127.
8. *Altintas, Y.* Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / Y. Altintas. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2012. – 374 p.
9. *Zakovorotnyi, V.* Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools / V. Zakovorotny // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. – 2015. – Vol. 10. – P. 102–116.
10. *Zakovorotny, V. L.* Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting / V. L. Zakovorotny, A. D. Lukyanov, A. A. Gubanova, V. V. Khristoforova // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Vol. 368. – P. 174–190.
11. *Бухгольц, Н. Н.* Основной курс теоретической механики. Ч. 2: Динамика системы материальных точек / Н. Н. Бухгольц. – Москва : Наука, 1972. – 332 с.
12. *Ляпунов, А. М.* Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов // Собр. соч. – Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1956. – Т. 2. – С. 7–263.

Статья поступила в редакцию 15.11.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 15.11.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 621.9:531.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-18-23

Научная статья

Original article

В. Е. Гвинджилия

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

✉ Валерия Енвериевна Гвинджилия, vvgvindjiliya@donstu.ru

Аннотация. Одно из направлений повышения точности изготовления валов связано с согласованием режимов резания с априорно заданным распределением жесткости заготовки. Для решения этой задачи необходимо вычислить траектории движения инструмента, учитывающие изменение жесткости вала, и затем выбрать такую их совокупность, в которой траектория упругих деформаций является асимптотически устойчивой. В представленной статье описывается методика вычисления множества желаемых траекторий и их взаимосвязь с программой ЧПУ.

Ключевые слова: динамическая система резания, заготовка малой жесткости, геометрическое качество

Финансирование. Работа проведена в рамках выполнения соглашения от 29.10.2025 года № 075-03-2025-302/8 на реализацию ПНИ «Разработка программно-аппаратных средств для мониторинга и анализа параметров резания и эксплуатационных характеристик станков с ЧПУ» (FZNE-2025-0008).

Для цитирования: Гвинджилия В. Е. Влияние динамических свойств процесса резания на геометрические характеристики изготовления маложестких валов. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 18–23. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-18-23

Информация об авторах:

Валерия Енвериевна Гвинджилия – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП, Донской государственной технической университет
orcid.org/0000-0003-1066-4604
e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

Вклад авторов:

В. Е. Гвинджилия – определение цели работы, написание статьи.

V. E. Gvindjiliya

**INFLUENCE OF CUTTING PROCESS DYNAMICS
ON THE GEOMETRY OF LOW-RIGIDITY SHAFTS**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

✉ Valeria E. Gvindzhilia, vvgvindjiliya@donstu.ru

Abstract. One approach to improving the machining accuracy of shafts involves aligning the cutting conditions with a pre-defined workpiece stiffness distribution. Solving this task requires calculating tool paths that account for the shaft's stiffness variation and subsequently selecting a set of paths where the trajectory of elastic deformations is asymptotically stable. This paper describes a methodology for computing the set of desired trajectories and their integration with the CNC program.

Keywords: dynamic cutting system, low rigidity workpiece, geometric quality

Financing. The work was carried out as part of the implementation of agreement No. 075-03-2025-302/8 dated 10/29/2025 for the implementation of the research project "Development of software and hardware for monitoring and analyzing cutting parameters and performance characteristics of CNC machines" (FZNE-2025-0008).

For citation: Gvindzhilia V. E. Influence of cutting process dynamics on the geometry of low-rigidity shafts. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 18–23. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-18-23

Information about the authors:

Valeria E. Gvindzhilia – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Department of Automation of Manufacturing Processes, Don State Technical University
orcid.org/0000-0003-1066-4604
e-mail: vvgvindjiliya@donstu.ru

Contribution of the authors:

Valeria E. Gvindzhilia – defining the purpose of the work, writing the article.

Введение

Изготовление валов, имеющих малую изгибную жесткость, вызывает большие сложности, обусловленные тем, что вдоль траектории движения инструмента изменяются упругие деформации, влияющие на формируемый диаметр заготовки [1–8]. Для обеспечения постоянства диаметра, используют методы, включающие в себя управление через варьирование режимов резания или упругих свойств системы [1–3], искусственное увеличение жесткости с помощью люнетов [4,7], силовую компенсацию влияния на деформации сил резания, имеющие противоположные направления с помощью многорезцовой обработки [6], управление напряженным состоянием заготовки [7].

Большинство методов требуют модернизации оборудования. Однако в условиях современного производства с ЧПУ более перспективен подход, основанный на синтезе управляющей программы, непосредственно учитывающей динамику деформаций и обеспечивающей требуемые траектории формообразующих движений инструмента.

В статье рассмотрена методика вычисления траекторий исполнительных элементов станка (ТИЭС), обеспечивающая требуемые показатели геометрической точности детали, на основе синергетического согласования внешнего управления с процессами обработки [8–10]. Для этого разработаны математическая модель управляемой динамической системы обработки

маложестких деталей и алгоритм вычисления программы ЧПУ для управляемой асимптотически устойчивой ТИЭС.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим пространство состояния динамической системы резания (ДСР) при тчении валов малой жесткости (рис. 1). Оно включает:

1. пространство ТИЭС (рис. 1), в котором заданы траектории перемещений

$$\mathbf{L} = \{L_1, L_2, L_3\}^T \in \mathfrak{R}_L^{(3)}$$

и скоростей $d\mathbf{L}/dt = \mathbf{V} = \{V_1, V_2, V_3\}^T$;

2. пространство деформаций инструмента

$$\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$$

и заготовки $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, Y_3\}^T \in \mathfrak{R}_Y^{(3)}$, а также скоростей

$$d\mathbf{X}/dt = \mathbf{v}_X = \{v_1, v_2, v_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)},$$

$$d\mathbf{Y}/dt = \mathbf{v}_Y = \{v_{1,y}, v_{2,y}, v_{3,y}\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}.$$

В этих же пространствах задаются силы, действующие на инструмент

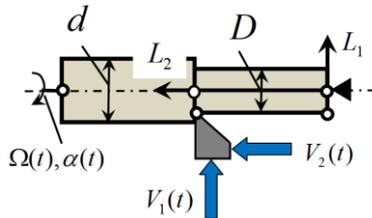


Рис. 1. Схема динамической системы продольного тчения вала

Для изучения свойств системы вдоль L_2 , необходимо выразить силы через координаты системы. Примем гипотезы, что силы пропорциональны площади срезаемого слоя. А ориентация

$$\mathbf{F}_X = \{F_{1,X}, F_{2,X}, F_{3,X}\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$$

и заготовки $\mathbf{F}_Y = \{F_{1,Y}, F_{2,Y}, F_{3,Y}\}^T \in \mathfrak{R}_Y^{(3)}$. Если

заданы \mathbf{F}_X и \mathbf{F}_Y , то их преобразование в деформации \mathbf{X} и \mathbf{Y} определяется системой

$$\begin{cases} \mathbf{m}^{(X)} \frac{d^2\mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h}^{(X)} \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c}^{(X)}\mathbf{X} = \mathbf{F}_X; \\ \mathbf{m}^{(Y)} \frac{d^2\mathbf{Y}}{dt^2} + \mathbf{h}^{(Y)} \frac{d\mathbf{Y}}{dt} + \mathbf{c}^{(Y)}\mathbf{Y} = \mathbf{F}_Y, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{m}^{(X)} = \text{diag}(m^{(X)})$, $\mathbf{m}^{(Y)} = \text{diag}(m^{(Y)})$;

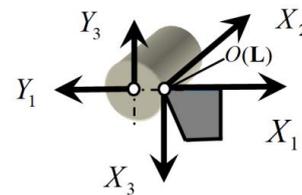
$$\mathbf{h}^{(X)} = [h_{s,i}^{(X)}], s, i = 1, 2, 3,$$

$$\mathbf{h}^{(Y)} = [h_{s,i}^{(Y)}], s, i = 1, 2, 3,$$

$$\mathbf{c}^{(X)} = [c_{s,i}^{(X)}], s, i = 1, 2, 3,$$

$$\mathbf{c}^{(Y)} = [c_{s,i}^{(Y)}], s, i = 1, 2, 3 \text{ – положительно опре-}$$

деленные, симметричные матрицы скоростных и упругих коэффициентов.



$$\begin{cases} \mathbf{m} \frac{d^2\mathbf{Z}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{Z}}{dt} + \mathbf{c}\mathbf{Z} = \mathbf{F}; \dots \dots \dots "a" \\ T^{(0)} \frac{dF^{(0)}(t)}{dt} + F^{(0)}(t) = \rho \{1 + \mu \exp[-\zeta(V_3 - v_3 - v_5)]\} [t_p^{(0)} - Z_1 - Z_4] \int_{t-T}^t \{V_2(\xi) - v_2(\xi)\} d\xi, \dots "b" \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mathbf{Z} = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5\}^T = \{X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_3\}^T$;
 $\mathbf{F} = F^{(0)} \{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_1, \chi_3\}^T$; $T^{(0)}$ – постоянная времени стружкообразования, с; ρ – давление стружки, кг/мм²; ζ – коэффициент наклона, с/мм; $T = (\Omega)^{-1}$ – время оборота, с; μ – безразмерный коэффициент.

В (2) обозначено $dZ_i/dt = v_i, i = 1, 2, \dots, 5$ скорость деформационных смещений. Примем вид суммарных матриц инерционных скоростных и упругих коэффициентов согласно [9], размерность зададим (5×5). В (2) учтено, во-первых, податливость в направлениях Y_1 и Y_3 на порядок больше, чем в направлении Y_2 . Поэтому деформации Y_2 можно не принимать во внимание.

Система (2) отличается от рассмотренной ранее в [9] следующими положениями:

1. учитываются одновременно деформации подсистемы инструмента и заготовки;
2. $m^{(0)}(\mathbf{L})$, $h^{(0)}(\mathbf{L})$ и $c^{(0)}(\mathbf{L})$ зависят от \mathbf{L} .

При определении программы ЧПУ необходимо в (2) подобрать такие траектории $\mathbf{V}(L_2)$, при которых обеспечиваются требования $\Delta d(t) = X_1 + Y_1 = const$. При определении восполь-

зуемся принципом разделения движений [9]. Тогда для вычисления медленных стационарных траекторий (1) и (2) имеем

$$\mathbf{c}_0 \mathbf{Z}^*(L_2) = \mathbf{F}_0, \quad (3)$$

где $\mathbf{F}_0 = \rho_0 S_P^{(0)} t_P^{(0)} \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_5\}^T$;

$\rho_0 = \rho[1 + \mu \exp(-V_3)]$;

$\mathbf{Z}(t) = \{Z_1, Z_1, \dots, Z_5\}^T = \{X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_3\}^Y$

$$\mathbf{c}_0 = \begin{bmatrix} (c_{1,1} + \chi_1 \rho_0 S_P^{(0)}) & c_{2,1} & c_{3,1} & (\chi_1 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 \\ (c_{1,2} + \chi_2 \rho_0 S_P^{(0)}) & c_{2,2} & c_{3,2} & (\chi_2 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 \\ (c_{1,3} + \chi_3 \rho_0 S_P^{(0)}) & c_{2,3} & c_{3,3} & (\chi_3 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 \\ (\chi_4 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 & 0 & [c^{(0)}(L_2) + \chi_4 \rho_0 S_P^{(0)}] & 0 \\ (\chi_5 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 & 0 & (\chi_5 \rho_0 S_P^{(0)}) & c^{(0)}(L_2) \end{bmatrix}.$$

Погрешность диаметра Δd , определяемая упругими деформациями

$$\Delta d(L_2) = 2(Z_1^* + Z_4^*), \quad (4)$$

где $Z_1^* + Z_4^* = \rho_0 S_P^{(0)} t_P^{(0)} c^{(0)}(L_2) \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta_0}$;

$$\Delta_0 = \begin{bmatrix} (c_{1,1} + \chi_1 \rho_0 S_P^{(0)}) & c_{2,1} & c_{3,1} & (\chi_1 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 \\ (c_{1,2} + \chi_2 \rho_0 S_P^{(0)}) & c_{2,2} & c_{3,2} & (\chi_2 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 \\ (c_{1,3} + \chi_3 \rho_0 S_P^{(0)}) & c_{2,3} & c_{3,3} & (\chi_3 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 \\ (\chi_4 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 & 0 & [c^{(0)}(L_2) + \chi_4 \rho_0 S_P^{(0)}] & 0 \\ (\chi_5 \rho_0 S_P^{(0)}) & 0 & 0 & (\chi_5 \rho_0 S_P^{(0)}) & c^{(0)}(L_2) \end{bmatrix};$$

$$\Delta_1 = \begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1} & c_{3,1} & (\chi_1 \rho_0 S_P^{(0)}) \\ \chi_2 & c_{2,2} & c_{3,2} & (\chi_2 \rho_0 S_P^{(0)}) \\ \chi_3 & c_{2,3} & c_{3,3} & (\chi_3 \rho_0 S_P^{(0)}) \\ \chi_4 & 0 & 0 & [c^{(0)}(L_2) + \chi_4 \rho_0 S_P^{(0)}] \end{bmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{bmatrix} (c_{1,1} + \chi_1 \rho_0 S_P^{(0)}) & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1 \\ (c_{1,2} + \chi_2 \rho_0 S_P^{(0)}) & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2 \\ (c_{1,3} + \chi_3 \rho_0 S_P^{(0)}) & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3 \\ \chi_4 \rho_0 S_P^{(0)} & 0 & 0 & \chi_4 \end{bmatrix}.$$

С помощью (4) можно определить зависимость деформаций от параметров системы, которые можно интерпретировать как управляющие параметры.

Анализ результатов

Приведенные зависимости определяют возможность и эффективность управления точностью изготовления валов малого диаметра с заданной функцией изгибной жесткости вдоль оси вала. Из (4) следует, что для обеспечения условия $\Delta d(L_2) = const$ в качестве управляющих параметров можно использовать технологиче-

ские режимы $V_P^{(0)}$, $t_P^{(0)}$ и $S_P^{(0)}$. Однако скорость резания ограничена условиями износостойкости инструмента, а вариации $t_P^{(0)}$ требуют малых реверсивных перемещений суппортной группы, что вызывает конструктивные сложности. Поэтому главный управляющий параметр – скорости подачи $V_P^{(0)}$, влияющая на величину подачи $S_P^{(0)}$ по закону:

$$S_P^{(0)}(t) = \int_{t-T}^t \{V_2^{(0)}(\xi) - v_2(\xi)\} dt, \quad (5)$$

где T – время одного оборота.

Для определения эффективности различных алгоритмов управления приведем примеры изменения $\Delta d(L_2)$ и образуемой геометрической топологии $\mathfrak{T}_C(\mathbf{L}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$ (рис. 2): при стабилизации диаметра на основе согласования скорости подачи с законом изменения податливости (1); при обработке на постоянных технологических режимах (2); при стабилизации модуля силы резания (3). Приведено также два примера $\mathfrak{T}_C(\mathbf{L}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$, соответствующие режиму «1» (верхняя иллюстрация) и режиму «2» (нижняя иллюстрация). Уменьшение погрешности (кривая 2) по сравнению со случаем «3» обусловлено тем, что формируемые процессом резания

силы образуют по отношению к деформациям отрицательную обратную связь. Уровень обратной связи, следовательно, стабилизация равновесия, возрастает при увеличении податливости заготовки.

Если в качестве изменяющихся параметров системы вдоль оси L_2 рассматривать вариации припуска, то стабилизация сил вызывает стабилизацию деформаций. Следовательно, при известном априорном законе изменения жесткости, но неопределенном припуске, алгоритм регулирования силами резания должен быть подчинен зависимости жесткости от положения суппорта по оси L_2 .

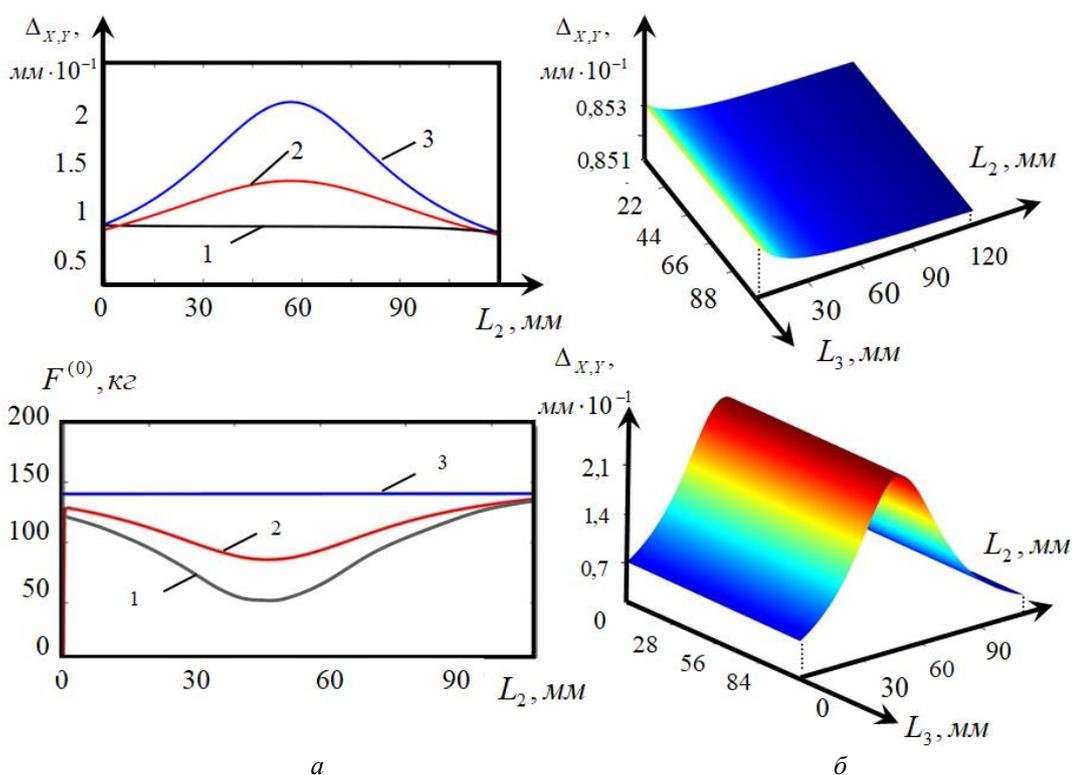


Рис. 2. Примеры деформаций и соответствующих им сил (а), а также топологий $\mathfrak{T}_C(\mathbf{L}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$ (б)

Заключение

Разработанный математический аппарат и результаты моделирования открывают путь к повышению производительности обработки за счет синтеза управляющих программ, согласованных с априорно известным законом изменения свойств системы. Например, при продольном точении мало жестких валов программирование траекторий, учитывающее изменение жесткости заготовки, возможно повышение производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю. М. Соломенцев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1980. – 555 с.
2. Świć, A. Technological Methods for Controlling the Elastic-Deformable State in Turning and Grinding Shafts of Low Stiffness / A. Świć, A. Gola, O. Oryńcz, K. Tucki, J. Matijošius // Materials. – 2022. – Vol. 15, no. 15. – P. 5265.
3. Азаров, А. С. Высокопроизводительная обработка валов в машиностроении / А. С. Азаров. – СПб. : Машиностроение, 2001. – 273 с.
4. Драчев, О. И. Способ токарной обработки мало жесткой длиномерной осесимметричной заготовки детали: пат. 2805022 Рос. Федерация: МПК В23В 1/00 / О. И. Драчев, Б. М. Горшков, Н. С. Самохина, А. Н. Кравцов ; зая-

витель и патентообладатель ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – № 2022105423 ; заявл. 01.03.2022 ; опубл. 10.10.2023, Бюл. № 28. – 12 с.

5. Амирджанова, И. Ю. Система автоматического управления процессом обработки нежестких деталей / И. Ю. Амирджанова, О. И. Драчев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (267) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 13–16.

6. Драчев, О. И. Двухрезцовое точение тел вращения / О. И. Драчев, А. Н. Кравцов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (255) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 21–24.

7. Драчев, О. И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей / О. И. Драчев. – Санкт-Петербург : Политехника, 2012. – 289 с.

8. Zakovorotnyi, V. L. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning / V. L. Zakovorotnyi, V. E. Gvindjiliya // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 112. – P. 202–213.

9. Заковоротный, В. Л. Динамика процесса резания. синергетический подход / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек. – Ростов-на-Дону : Терра, 2006. – 880 с.

10. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023688372 Российская Федерация. Построение 3d-модели геометрической топологии поверхности детали на основе деформационных смещений инструмента / В. Е. Гвинджилия, В. Л. Заковоротный ; правообладатель ФГБОУ ВО ДГТУ. – № 2023685238 ; заявл. 22.11.2023 ; опубл. 21.12.2023, Реестр программ для ЭВМ.

Статья поступила в редакцию 15.11.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 15.11.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 621.9.06

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-23-26

Научная статья

Original article

Б. М. Горшков¹, Н. С. Самохина²

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КООРДИНАТНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ

¹ Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

² Поволжский государственный университет сервиса, Тольятти, Россия

✉ Наталья Станиславовна Самохина, Skipert-99@yandex.ru

Аннотация. В работе предложен метод оценки влияния упругих деформаций на точность обработки на координатно-расточном станке 2A459СФ4. Эксперимент, включавший многоступенчатую расточку отверстий в чугунной корпусной заготовке и высокоточные измерения, выявил прямую зависимость между весовыми нагрузками, деформацией станины и уводом оси отверстия. Для минимизации погрешностей разработаны практические рекомендации по компенсации деформаций, включающие использование гидросистем и оптимизацию жесткости станка.

Ключевые слова: корпусная заготовка, координатно-расточной станок, упругие деформации, точность обработки, контроль, компенсация деформаций, прецизионная обработка

Для цитирования: Горшков Б. М., Самохина Н. С. Технологические методы повышения точности координатно-расточных станков. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 23–26. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-23-26

Информация об авторах:

Борис Михайлович Горшков – д-р техн. наук, профессор кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» Тольяттинского государственного университета, институт машиностроения Региональный проектный офис инжиниринга, научно-исследовательская часть.

orcid.org/0009-0000-9497-1294

e-mail: gbmboris@yandex.ru

Наталья Станиславовна Самохина – канд. техн. наук доцент Высшей школы передовых производственных технологий, Поволжский государственный университет сервиса.

orcid.org/0009-0000-6829-8972

e-mail: skipert-99@ya.ru

Вклад авторов:

Б. М. Горшков – концепция исследования, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, утверждение окончательной версии статьи.

Н. С. Самохина – проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

B. M. Gorshkov¹, N. S. Samokhina¹

**TECHNOLOGICAL METHODS FOR INCREASING
THE ACCURACY OF COORDINATE BORING MACHINES**

¹Togliatti State University, Tolyatti, Russia

²Volga Region State University of Service, Tolyatti, Russia

✉ Natalia S. Samokhina, Skipert-99@yandex.ru

Abstract. The paper proposes a methodology for assessing the influence of elastic deformations on machining accuracy using a 2A459SF4 jig boring machine as an example. An experiment involving multi-stage boring of holes in a cast iron casing workpiece and high-precision measurements revealed a direct relationship between weight loads, bed deformation, and hole axis drift. Practical recommendations for deformation compensation, including the use of hydraulic systems and machine stiffness optimization, have been developed to minimize errors.

Keywords: casing workpiece, jig boring machine, elastic deformations, machining accuracy, inspection, deformation compensation, precision machining

For citation: Gorshkov B. M., Samokhina N. S. Technological methods for increasing the accuracy of coordinate boring machines. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 23–26. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-23-26

Information about the authors:

Boris M. Gorshkov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Equipment and Technologies of Machine-building Production", Institute of Mechanical Engineering, Regional Design Office of Engineering, Scientific research unit Tolyatti State University

orcid.org/0009-0000-9497-1294

e-mail: gbmboris@yandex.ru

Natalia S. Samokhina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Higher School of Advanced Production Technologies, Volga State University of Service.

orcid.org/0009-0000-6829-8972

e-mail: Skipert-99@ya.ru

Contribution of the authors:

Boris M. Gorshkov – research concept, editing of the text of the manuscript, design of the manuscript, approval of the final version of the article.

Natalia S. Samokhina – conducting experimental research, processing and analyzing research results, writing the text of the article.

Введение

Современное машиностроение, особенно производство сложных корпусных деталей, предъявляет повышенные требования к точности обработки, поскольку отклонения формы и расположения поверхностей критически влияют на функциональность и надежность изделий. Ключевым фактором, лимитирующим точность, являются упругие деформации несущей системы оборудования, возникающие под действием веса заготовки, подвижных узлов и сил резания [1, 2]. Эти деформации приводят к систематическим погрешностям, таким как увод оси обрабатываемых отверстий, что снижает качество продукции и увеличивает себестоимость.

Анализ литературных источников показывает, что проблема компенсации деформаций активно исследуется. В работах [3, 4] предложены решения на основе гидравлических систем, а в [5] – за счет применения материалов с повышенной жесткостью. Однако для координатно-расточных станков (КРС) модели

2A459СФ4 комплексные исследования в данной области ранее не проводились, что определяет научную новизну настоящей работы.

Цель исследования – разработка метода анализа и компенсации упругих деформаций несущей системы КРС для повышения точности обработки глубоких отверстий в корпусных заготовках.

Материалы и методы исследования: объектом исследования служила корпусная заготовка из серого чугуна СЧ 25 (ГОСТ 1412–85), конструкция которой включала внутренние перегородки для моделирования реальных условий обработки. Обработка и замеры проводились на прецизионном горизонтальном КРС мод. 2A459СФ4.

Методика эксперимента включала следующие этапы:

1. Подготовка и базирование. Положение заготовки на столе станка было выверено с высокой точностью с использованием электронных уровней ИН-ДЗ (разрешающая способность – 0,1 угловой секунды).

2. Многоступенчатая обработка. На стороне заготовки по заданной разметке было обработано 98 отверстий в двух стенках. Процесс состоял из четырех последовательных операций:

- сверление ($\varnothing 27$ мм, 12-й квалитет);
- рассверливание ($\varnothing 34$ мм, 12-й квалитет);
- чистовое растачивание ($\varnothing 35$ мм, 9-й квалитет);
- тонкое растачивание ($\varnothing 36$ мм, 6-й квалитет).

Для каждой операции были строго регламентированы режимы резания и используемый инструмент.

3. Компенсация деформаций. Для устранения влияния деформаций станины от весовых нагрузок использовалась система из четырех гидравлических домкратов.

4. Контроль точности. Отклонение от круглости и увод оси отверстий измерялись с помощью специализированного устройства на базе индикаторного нутромера. На основе полученных данных строились круглограммы в полярной системе координат, что позволило количественно оценить погрешности в проекциях на оси OX и OY .

Результаты и обсуждение

Экспериментально установлено, что упругие деформации станины, вызванные весом стойки (рис. 1) и заготовки (рис. 2), приводят к значительному уводу оси обработанных отверстий, достигающему 0,02 мм. Наибольшее влияние на погрешность формы оказывает изгиб станины.

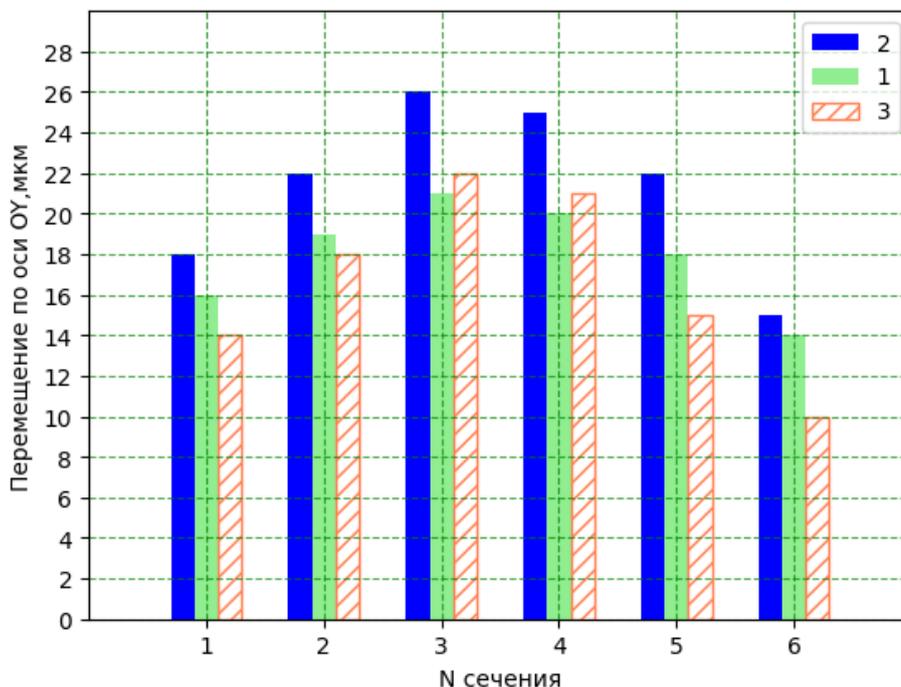


Рис. 1. Смещение осей от воздействия веса стойки

Полученные результаты согласуются с данными исследований [6, 7], подтверждающими существенный вклад весовых нагрузок в общую погрешность обработки. В качестве эффективных мер компенсации деформаций можно рассмотреть:

1. Применение гидравлических систем выравнивания станины в реальном времени.
2. Оптимизацию конструкции с использованием более жестких материалов.
3. Внедрение активных систем компенсации, корректирующих положение инструмента или заготовки на основе данных мониторинга.

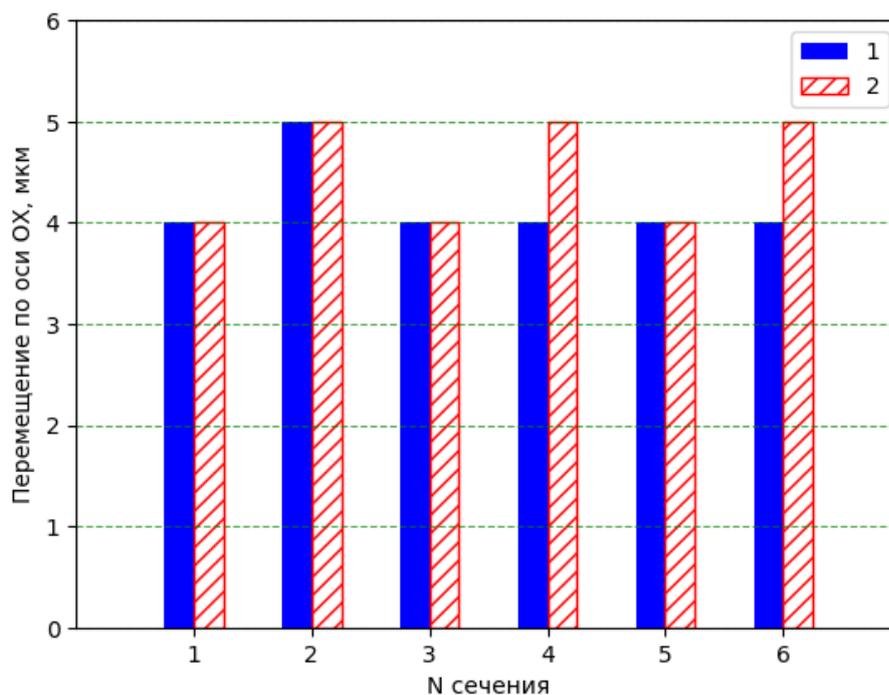


Рис. 2. Смещение осей от воздействия веса заготовки

Выводы

1. Разработана и апробирована метод экспериментального исследования влияния упругих деформаций на точность обработки на координатно-расточных станках.

2. Количественно оценено влияние веса стойки и заготовки на деформацию станины, приводящую к отклонению осей отверстий до 0,02 мм.

3. Научно обоснованы и предложены практические методы компенсации деформаций, направленные на повышение точности и надежности обработки на прецизионном оборудовании

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горшков, Б. М. Исследование технологических систем прецизионных горизонтальных координатно-расточных станков методом конечных элементов / Б. М. Горшков, Н. С. Самохина, О. Ю. Ремнева // *Металлообработка*. – 2012. – № 4(70). – С. 69–73.

2. Горшков, Б. М. Рабочая позиция с жесткой межрагательной связью / Б. М. Горшков, И. Н. Бобровский, Н. С. Самохина, А. В. Савельев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 45–50.

3. Горшков, Б. М. Статическая настройка элементов технологической системы координатно-расточного станка при обработке отверстий / Б. М. Горшков, Н. С. Самохина, М. А. Рубцов, О. Ю. Ремнева // *Автоматизация. Современные технологии*. – 2016. – № 3. – С. 3–5.

4. Горшков, Б. М. Опыт-экспериментальная установка для оценки эффективности повышения точности координатно-расточных станков / Б. М. Горшков, О. Ю. Ремнева, Д. В. Вылегжанин, Н. С. Самохина // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2011. – № 2(16). – С. 121–124.

5. Pereverzev, P. P. Relation Between the Cutting Force in Internal Grinding and the Elastic Deformation of the Technological System / P.P. Pereverzev, A.V. Popova, D.Yu. Pimenov // *Russian Engineering Research*. – 2015. – Vol. 35. – No. 3. – Pp. 215–217.

6. Popova, A. V. Design of Optimal Internal Grinding Cycles / A. V. Popova // *Russian Engineering Research*. – 2015. – Vol. 35. – No. 5. – Pp. 378–380.

7. Bobrowski, A. V. Improving the operational accuracy of shafts by volumetric plastic deformation / A. V. Bobrowski, O. I. Drachev, B. M. Gorshkov // Available online, 2020.

Статья поступила в редакцию 27.10.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 27.10.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 621.91.01
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-27-32

Научная статья
Original article

Н. Ж. А. Зебазе¹, Ю. Л. Чигиринский¹, Д. В. Моисеев²

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

¹ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

² Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

✉ Юлий Львович Чигиринский, julio-tchigirinsky@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с закономерным изменением некоторых теплофизических (коэффициент теплопроводности) и механических (временное сопротивление разрыву) свойств при увеличении температуры до величин, характерных для процесса лезвийной обработки сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов. Показано, что легирование стали хромом и никелем существенно изменяет теплофизические свойства конструкционного материала, что отражается на состоянии материала при высоких температурах и обрабатываемости аустенитной стали резанием.

Ключевые слова: коррозионнотойкая сталь, неустойчивость процесса резания, температура резания, временное сопротивление разрыву, теплопроводность

Для цитирования: Зебазе Н. Ж. А., Чигиринский Ю. Л., Моисеев Д. В. Изменение теплофизических и механических свойств сталей при механической обработке. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 27–32. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-27-32

Информация об авторах:

Нджапоу Жизлейн Анисе Зебазе – аспирант кафедры ТМС, ВолгГТУ

РИНЦ AuthorID: 1285894

e-mail: ndjase@gmail.com

Юлий Львович Чигиринский – профессор, д-р техн. наук заведующий кафедрой ТМС, ВолгГТУ

РИНЦ AuthorID: 473976

e-mail: julio-tchigirinsky@yandex.ru

Дмитрий Владимирович Моисеев – профессор, д-р техн. наук заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы», Севастопольский государственный университет, директор института информационных технологий.

РИНЦ AuthorID: 781811

e-mail: dvmoiseev@sevsu.ru

Вклад авторов:

Н. Ж. А. Зебазе – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Ю. Л. Чигиринский – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

Д. В. Моисеев – определение цели работы, составление статьи, участие в обсуждении результатов.

N. G. A. Zebaze¹, Ju. L. Tchigirinsky¹, D. V. Moiseev²

MODIFICATION THE THERMOPHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS DURING MACHINING

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

² Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

✉ Juliy L. Tchigirinsky, julio-tchigirinsky@yandex.ru

Abstract. The issues related to the natural change of some thermophysical (thermal conductivity coefficient) and mechanical (temporary tear resistance) properties with increasing temperature to values characteristic of the process of blade processing of pearlite, martensitic and austenitic steels are considered. It is shown that alloying steel with chromium and nickel significantly modify the thermophysical properties of the structural material, which affects the state of the material at high temperatures and the machinability of austenitic steel by cutting.

Keywords: corrosion-resistant steel, cutting process instability, cutting temperature, temporary tear resistance, thermal conductivity

For citation: Zebaze N. Zh. A., Tchigirinsky Ju. L., Moiseev D. V. Modification the thermophysical and mechanical properties of steels during machining. Izvestia of VSTU, 2026, 1(308): 27–32. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-27-32

Information about the authors:

Njapou Zhizlein Anise Zebase – Postgraduate Student at the Department of TMS, VSTU

RSCI AuthorID: 1285894

e-mail: ndjase@gmail.com

Juliy L. Tchigirinsky – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of TMS, VSTU

RSCI AuthorID: 473976

e-mail: julio-tchigirinsky@yandex.ru

Dmitry V. Moiseev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Information Technologies and Systems, Sevastopol State University, Director of the Institute of Information Technology.

RSCI AuthorID: 781811

e-mail: dvmoiseev@sevsu.ru

Contribution of the authors:

Njapou Ghislaine Anise Zebase – processing and analysis of research results, writing the text of the article.

Juliy L. Tchigirinsky – defining the purpose of the work, participating in the discussion of the results.

Dmitry V. Moiseev – defining the purpose of the work, drafting the article, participating in the discussion of the results.

Введение

Принято считать [1–3], что в формировании температурного поля и распределении тепловых потоков при однолезвийной обработке участвуют два элемента технологической системы: заготовка и режущий инструмент. Следовательно, тепловая и силовая «картины» процесса определяется свойствами материалов – теплофизическими и механическими, – контактной пары «инструмент-заготовка». Однако, при анализе процессов стружкообразования, формирования качества обработанной поверхности и изнашивания инструмента необходимо учитывать, что и теплофизические и механические свойства материалов существенно зависят от температуры. Кроме того, как правило, в качестве допущения принимается, что теплофизические и механические свойства стружки и заготовки одинаковы.

Механическая обработка резанием сопровождается высокими скоростями деформации, локальными температурами до 600...900 °С и интенсивным трением на передней и задней поверхностях инструмента. Эти факторы вызывают изменение теплофизических и механических свойств сталей различных структурных классов – ферритных, мартенситных и аустенитных [1, 4].

Цель исследования – качественно оценить влияние структурно-фазового состава и вариативности теплофизических и физико-механических свойств материала заготовки на стабильность процесса обработки. Основная гипотеза: для сталей с различным структурно-фазовым составом – ферритных 40, 40Х, мартенситных 40Х13 и аустенитных 12Х18Н10Т, – различный характер изменения теплофизических и механических характеристик является причи-

ной возникновения неустойчивости процесса стружкообразования, поскольку изменение уровня температур в зоне контакта инструмента с заготовкой и стружкой может вызывать существенные колебания свойств конструкционного материала.

Материалы и методы исследования

Геометрические характеристики режущего инструмента из твердого сплава Т15К6, используемого для продольной чистовой обработки, следующие: передний угол $\gamma = 0^\circ$, главный задний угол $\alpha = 10^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$. Исследование проводится в диапазоне скоростей резания $V \in [50..200]$ м/мин и скоростей продольной подачи $S \in [0,1..0,4]$ мм/об, что соответствует среднеинтегральным температурам в зоне резания в пределах [5] $\Theta \in [750..800]$ °С.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследований с использованием методов регрессионного анализа [6, 7] необходимо получить достаточно достоверное алгебраическое описание закономерностей изменения рассматриваемых функций отклика (коэффициент теплопроводности λ , табл. 1, рис. 1, и временное сопротивление разрыву σ_b , табл. 2, рис. 2) при изменении температур в рассматриваемом диапазоне.

Традиционно в технологических задачах рассматриваются [7] три спецификации регрессионных моделей – в нашем случае, однофакторных двухпараметрических: линейная, степенная и показательная.

Таблица 1

Коэффициент теплопроводности сталей, λ (Вт/м·К)

Температура, °С		20	100	200	300	400	500	600	700	800
марка стали	40	49	49	49	47	44	41	38	35	29
	40X	47	46	43	39	36	32,5	31	29,5	
	40X13	25	26	27	28	29	29	29	29	29
	12X18H10T	15	16	18	20	21	23	25	26	28

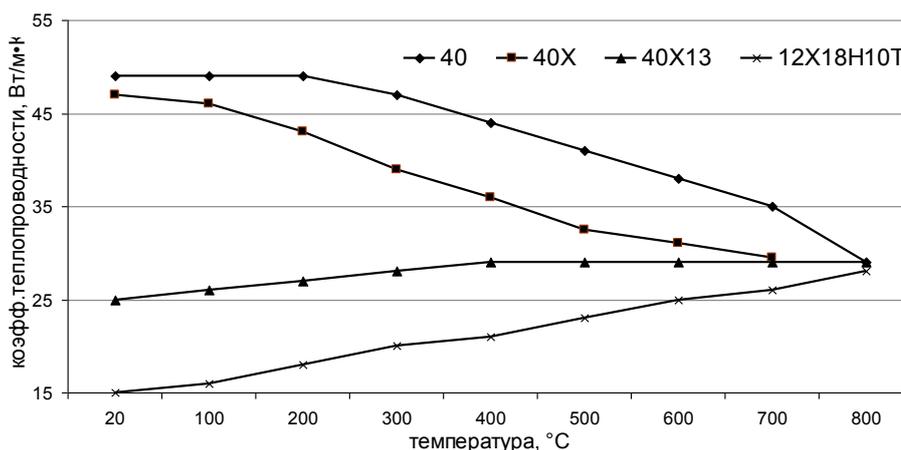


Рис. 1. Коэффициент теплопроводности перлитно-ферритной (40, 40X), мартенситной (40X13) и аустенитной (12X18H10T) сталей

Таблица 2

Временное сопротивление разрыву (σ_b) для сталей

Температура (°С)		20	100	200	300	400	500	600	700	800
марка стали	40	600	620	580	550	450	300	250	150	110
	40X	900	850	800	750	550	400	200	120	90
	40X13	750	730	700	670	600	450	250	150	80
	12X18H10T	610	540	500	480	420	410	360	285	120

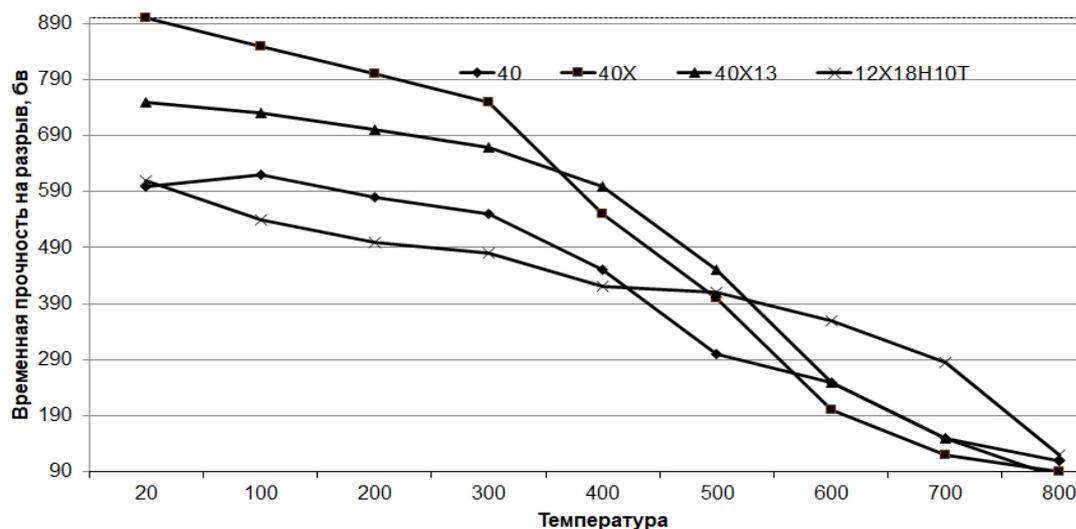


Рис. 2. Временное сопротивление на разрыв перлитно-ферритной (40, 40X), мартенситной (40X13) и аустенитной (12X18H10T) сталей

Предварительные расчеты позволили определить наиболее адекватную и достоверную для рассматриваемой задачи спецификацию модели – линейную (табл. 3).

Достоверность модели оценивается по величине средней относительной погрешности, адекватность – по вероятностному критерию Фишера [7].

Таблица 3

Оценка достоверности линейных моделей теплофизических и физико-механических свойств сталей

сталь	Коэффициент теплопроводности λ				Временное сопротивление разрыву σ_B			
	относительная погрешность, %			адекват. %	относительная погрешность, %			адекват. %
	мин	макс	сред		мин	макс	сред	
40	0,70%	9,98%	3,88%	99,98%	0,07%	18,93%	8,69%	99,99%
40X	0,09%	99,99%	22,28%	98,20%	0,56%	88,11%	20,54%	99,99%
40X13	0,40%	4,03%	2,09%	98,91%	3,46%	29,29%	16,17%	99,98%
12X18H10T	0,05%	1,92%	0,95%	99,99%	0,40%	42,10%	10,46%	99,97%

Рассмотренные стали – 40, 40X, 40X13 и 12X18H10T, – представляют собой четыре различных состояния системы Fe–C–Cr (и Fe–Cr–Ni для 12X18H10T), демонстрирующие, как содержание хрома определяет температурные границы фаз, стабильность структур и их трансформации. На диаграмме Fe–C (до 800 °C) выделены структурные области для сталей 40, 40X, 40X13 и 12X18H10T.

Диаграмма Fe–C (рис. 3) в интервале до 800 °C показывает классическое поведение нелегированных сталей: по эвтектоидной точке

принимаям $A_1 \approx 727$ °C формируются структуры феррит–перлит, между A_1 и A_3 наблюдается область феррит–аустенит, а выше A_3 – область стабильного аустенита. Однако при введении хрома (Cr) – одного из наиболее сильных ферритообразующих и карбидообразующих элементов, – характер фазовых превращений в сталях изменяется существенно. Таким образом, хром может либо расширять область феррита, либо при взаимодействии с никелем (Ni) – формировать устойчивый аустенит, полностью меняя характер фазовых превращений.

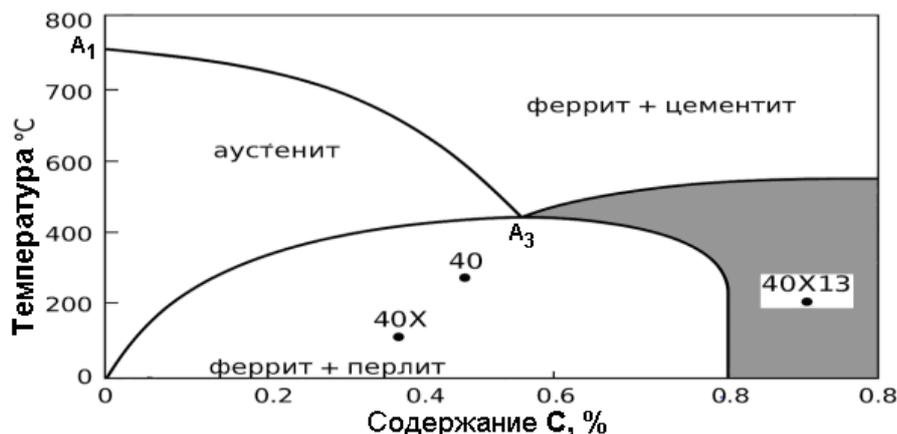


Рис. 3. Диаграмма Fe–C с выделением областей структур для сталей 40, 40X, 40X13 и 12X18H10T

Для приближенной оценки линии A_3 (гипоэвтектоидная аппроксимация) можно использовать эмпирическую кривую; для «чистой» (без примесей и легирующих элементов) системы Fe–C при содержании углерода 0,40 % получаем $A_3 \approx 800$ – 820 °C (зависит от формулы). Легирующие элементы (Cr, Ni, Ti и др.) сдвигают

линии A_1/A_3 и вводят карбидные области – значения температур определяются с учетом типичных эффектов легирования (качественно) и со ссылкой на стандартную интерпретацию диаграммы Fe–C. Для определения более точных значений температур фазовых границ для конкретных сталей можно использовать метод

расчета фазовых диаграмм в многокомпонентных системах Fe–Cr–C [https://calphad.org/] или подобные справочные данные или методики.

Обсуждается влияние легирующих элементов, таких как хром, на диаграмму железо-углерод и температуры структурных преобразований в сталях. В легированных сталях (рис. 2) в диапазоне температур 400..500 °С наблюдается резкое снижение прочности Бв, чего не происходит у стали 40. Причина этого явления – наличие хрома в составе стали. Вместе с тем, у легированных сталей с ростом температуры фиксируется изменение теплопроводности не только по величине, но и по характеру изменения. Отмечается, что у феррито-перлитных сталей (40, 40X) при повышении температуры до значений, соответствующих среднеинтегральной температуры на передней поверхности инструмента, снижение теплопроводности достигает 50..55 %. В то же время, у мартенситной стали 40X13 теплопроводность остается практически стабильной – повышение в пределах 13..15 %, а для аустенитной стали 12X18Н10Т коэффициент теплопроводности значительно, – до 82..86 %, – повышается. Повышение теплопроводности конструкционного материала приводит к перераспределению тепловых потоков и уводу части тепловой энергии в стружку. Как следствие, с определенным запаздыванием, происходит снижение температуры в зоне стружкообразования, соответственно, повышение прочности обрабатываемого материала и сил резания, повышение теплопроводности. Этот процесс повторяется циклически, причем цикличность тем более выражена, чем более интенсивно происходит изменение теплопроводности материала заготовки.

Диапазон температур от 300 до 500 °С соответствует зоне активного поступления и структурных преобразований, где свойства изменяются наиболее существенно. Это зона, где структуры сталей начинают «оживать»: происходят процессы изменения теплопроводности и прочности. Мартенситные стали (40X, 40X13) изменяют структуру после термической обработки, что влияет на теплопроводность и твердость, а аустенитная сталь (12X18Н10Т) остается практически стабильной, поэтому ее свойства изменяются минимально.

Теплопроводность мартенситной стали 40X13 и аустенитной стали 12X18Н10Т увеличивается с ростом температуры и может сократить срок службы инструмента. А. А. Липатов

[7, 8] изучил эти закономерности и отметил, что теплопроводность материала режущей части инструмента оказывает значительное влияние на интенсивность изнашивания и период стойкости инструмента. Действительно, высокая теплопроводность обеспечивает более равномерное распределение тепла и снижение интенсивности циклических процессов в зоне стружкообразования, что снижает износ инструмента и увеличивает его срок службы. И наоборот, низкая теплопроводность означает, что тепло, выделяемое во время резания, имеет тенденцию оставаться сконцентрированным в зоне резания и передаваться инструменту, а не эффективно рассеиваться в массе заготовки.

Заключение

Температура в зоне резания резко влияет на теплофизические свойства всех сталей, особенно мартенситных и ферритных. Наиболее интенсивное изменение теплопроводности обрабатываемого материала происходит у аустенитной стали 12X18Н10Т, что приводит к усиленному износу инструмента. Мартенситная сталь 40X13 склонна к отпуску поверхности, что уменьшает твердость и изменяет характер износа. Ферритные стали (40, 40X) демонстрируют умеренный наклеп и достаточно стабильное поведение, что облегчает обработку. Изменения механических свойств коррелируют с температурой и скоростью резания, что важно учитывать при выборе режимов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Талантов, Н. В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
2. *Липатов, А. А.* Температурно-силовые характеристики контактного взаимодействия на площадке износа задней поверхности инструмента при точении аустенитной стали / А. А. Липатов, Ю. Л. Чигиринский, С. И. Кормилицин // *Обработка металлов.* – 2012. – № 2. – С. 38–42.
3. *Талантов, Н. В.* Физические основы процесса резания / Н. В. Талантов // *Физические процессы при резании металлов: сб. науч. трудов.* – Волгоград: Изд. ВПИ. – 1984. – 179 с.
4. *Резников, А. Н.* Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
5. *Липатов, А. А.* Расчет температуры на режущих поверхностях инструмента с учетом зависимости теплопроводности обрабатываемого материала от температуры / А. А. Липатов, Ю. Л. Чигиринский // *СТИН.* – 2012. – № 7. – С. 28–30.
6. *Чигиринский, Ю. Л.* Статистическое моделирование шероховатости поверхности при чистовом точении углеродистой стали / Ю. Л. Чигиринский, Н. Ж. А. Зебазе, Н. В. Чигиринская, П. А. Норченко, И. К. Демченко // Со-

временные наукоемкие технологии. – 2025. – № 4. – С. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.40370>

7. Чигиринская, Н. В. Моделирование неперiodических стохастических процессов : учеб. пособие / Н. В. Чигиринская, Ю. Л. Чигиринский, А. С. Горобцов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – 108 с.

8. Липатов, А. А. Влияние характера зависимости теплопроводности обрабатываемого материала от температуры на закономерности контактного взаимодействия и тип стружкообразования / А. А. Липатов // СТИН. – 2006. – № 8. – С. 37–40.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025
The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 621-039-419; 620.22-419
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-32-35

Научная статья
Original article

И. В. Злобина^{1,2}, Н. В. Бекренев¹

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ФИНИШНОЙ ОПЕРАЦИИ ИХ СВЧ ОБРАБОТКИ

¹ Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, г. Саратов, Россия

² НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

✉ Ирина Владимировна Злобина, irinka_7_@mail.ru

Аннотация. В статье изложены результаты количественного анализа изменений микроструктуры отвержденных полимерных композиционных материалов (ПКМ) под влиянием воздействия СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц и плотностью потока энергии (ППЭ) $(17-18) \cdot 10^4$ мкВт/см² на финишной стадии технологического цикла. Констатируется увеличение количества элементов микроструктуры в опытных образцах в 2,5 раза при одновременном уменьшении их среднего размера на 40 % и сокращении расстояния между ними на 42 %.

Ключевые слова: изделия из полимерных композиционных материалов, микроструктура, модификация, СВЧ электромагнитное поле

Для цитирования: Злобина И. В., Бекренев Н. В. Повышение качества изделий из полимерных композиционных материалов путем введения финишной операции их СВЧ обработки. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 32–35. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-32-35

Информация об авторах:

Николай Валерьевич Бекренев – профессор, д-р техн. наук, кафедра «Техническая механика и мехатроника», Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина

РИНЦ AuthorID: 271817

e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru

Ирина Владимировна Злобина – канд. техн. наук, кафедра «Техническая механика и мехатроника», Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина

РИНЦ AuthorID: 686083

e-mail: irinka_7_@mail.ru

Вклад авторов:

Н. В. Бекренев – определение цели работы, исследование микроструктуры, участие в обсуждении результатов.

И. В. Злобина – написание статьи, проведение экспериментов.

I. V. Zlobina^{1,2}, N. V. Bekrenev¹

IMPROVING THE QUALITY OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BY INTRODUCING A FINISHING OPERATION FOR THEIR MICROWAVE TREATMENT

¹ Yuri Gagarin Saratov state technical University, Saratov, Russia,

² Kurchatov Institute, Moscow, Russia

✉ Irina V. Zlobina, irinka_7_@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a quantitative analysis of changes in the microstructure of cured polymer composite materials (PCM) under the influence of a microwave electromagnetic field with a frequency of 2450 MHz and an energy flux density (EEF) $(17-18) \cdot 10^4$ μW/cm² at the final stage of the technological cycle. An increase in the number of microstructural elements in the experimental samples was found to be 2.5 times, while reducing their average size by 40 % and reducing the distance between them by 42 %.

Keywords: polymer composite materials, microstructure, modification, microwave electromagnetic field

For citation: Zlobina I. V., Bekrenev N. V. Improving the quality of polymer composite materials by introducing a finishing operation for their microwave treatment. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 32–35. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-32-35

Information about the authors:

Nikolai V. Bekrenev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Saratov State Technical University. Gagarina Yu.A.

RSCI AuthorID: 271817

e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru

Irina V. Zlobina – Candidate of Technical Sciences, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Saratov State Technical University. Gagarina Yu.A.

RSCI AuthorID: 686083

e-mail: irinka_7_@mail.ru

Contribution of the authors:

Nikolai V. Bekrenev – definition of the purpose of the work, study of the microstructure, participation in the discussion of the results.

Irina V. Zlobina – writing articles, conducting experiments.

Благодаря высокой удельной прочностью ПКМ по сравнению с металлами и сплавами, а также возможностью формировать заданные по условиям эксплуатации свойства одновременно с формообразованием изделия стабильно расширяются как области применения, так и объемы их производства [1, 2]. В тоже время, ПКМ, в частности, на эпоксидном связующем, имеют существенные недостатки, к важнейшим из которых относятся малая, по сравнению с металлами, стойкость к ударным воздействиям, низкая теплопроводность, повышенная ползучесть. К одним из наиболее распространенных и опасных дефектов относятся непроклеи, расслоения, поры, т.е. дефекты, связанные с несплошностью контакта армирующего компонента ПКМ и связующего [3, 4]. В частности, несмотря на малые значения пористости в качественных ПКМ, известно, что пористость в 1 % приводит к снижению статической прочности конструкции на 5 %, а усталостной прочности – на 50 % [5, 6]. В связи с указанными особенностями ПКМ для совершенствования технологий производства изделий из них характерен поиск физических и химических методов модификации, способствующих уменьшению дефектности структуры и формированию надежного взаимодействия компонентов. Одним из эффективных методов физической модификации является обработка отвержденных ПКМ, включая конечные изделия, в СВЧ электромагнитном поле [7]. Для практического внедрения данного метода важно выявление механизма положительного влияния СВЧ электромагнитного поля на отвержденные композитные системы.

Целью исследований явилось изучение

и анализ изменений в микроструктуре отвержденных ПКМ, возникших в результате СВЧ воздействия, для обоснования целесообразности введения в технологический процесс дополнительной модифицирующей операции.

В экспериментах использовали образцы конструкционного углепластика на эпоксидном связующем ЭД-20 (отвердитель ПЭПА) производства ООО «Еврокомплект», г. Калуга в виде плоскопараллельных пластин размерами 70x10x5 мм, полученных методом прессования с тканым наполнителем (схема армирования 0-90). СВЧ обработку одновременно по 5 образцов осуществляли на экспериментальном оборудовании, созданном на базе установки «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск, Калужской обл.) с камерой лучевого типа с неограниченным объемом (излучение в открытое пространство) при частоте 2450 МГц и плотности потока энергии $(17-18) \cdot 10^4$ мкВт/см² в течение 2 минут, которые обеспечивают максимальный упрочняющий эффект СВЧ воздействия [8]. Характеристики микроструктуры исследовали при помощи растрового электронного микроскопа MIRA II LMU Tescan и методом рентгеновской компьютерной томографии. РЭМ изображения анализировали в программной среде Thixomet Lite.

Анализ РЭМ изображений поверхности исследованных образцов ПКМ показал, что большая часть особенностей микроструктуры может быть однозначно определена при увеличении $\times 10000$. РЭМ изображения типичного характера микроструктуры контрольных и опытных образцов и изображения, обработанные в анализаторе Thixomet Lite представлены на рис. 1, анализ результатов – в табл. 1.

Для опытных образцов характерно уменьшение расстояния между объектами. Воздействие СВЧ электромагнитного поля вызывает уменьшение размеров фиксируемых на изо-

бражениях элементов структуры (матрицы), что проявляется в уменьшении как максимального, так и среднего размеров.

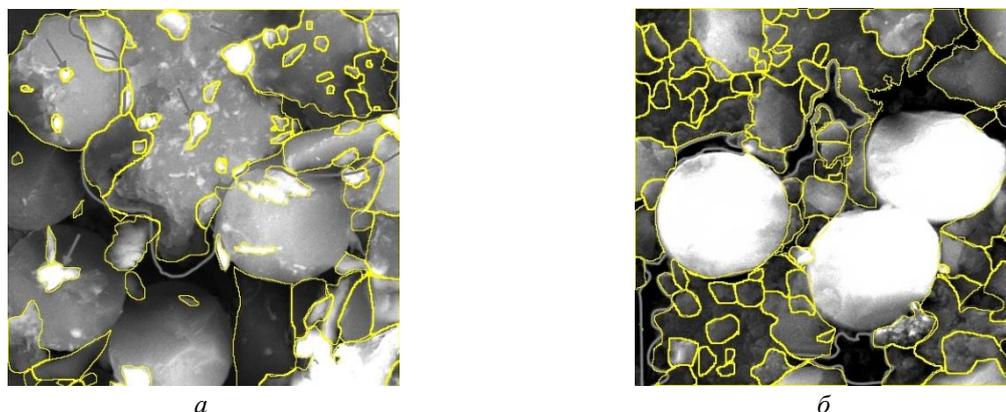


Рис. 1. Обработанные при помощи анализатора Thixomet Lite изображения микроструктуры контрольного (а) и опытного (б) образцов

Таблица 1

Изменение параметров, характеризующих микроструктуру контрольного и опытных образцов

Вид образца	Контрольный	Опытный	Изменение опытн. / контр.
Суммарное количество объектов в поле зрения	89	226	2,54
Среднее расстояние между объектами, мкм	2,26	1,38	0,575
Средний диаметр, мкм	7,06	4,31	0,61
Доверительный интервал	0,92	0,48	0,52

Отмечается значительное снижение доверительных интервалов выявленных параметров микроструктуры опытных образцов, что свидетельствует о повышении ее однородности и, соответственно, о повышении качества изделия.

Типичные томограммы контрольного и опытного образцов представлены на рис. 2. При их

анализе были исключены поверхностные слои по причине неизбежных множественных дефектов, связанных с выходом газов из объема при прессовании, извлечением из пресс-формы и другими механическими повреждениями, которые, находясь на поверхности, не могут оказать существенного влияния на прочностные и жесткостные характеристики.

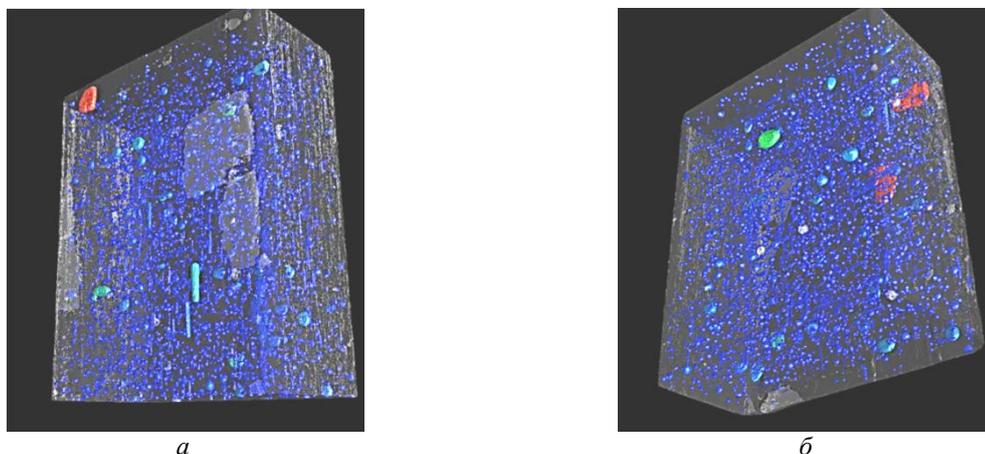


Рис. 2. Типичные томограммы контрольного (а) и опытного (б) образцов

Обработка томограмм по сечениям в плоскостях X, Y и Z позволила получить средние значения пористости и размеров пор в кон-

трольных и опытных образцах, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Среднестатистические величины пористости и размеров пор

Параметр	Плоскость X		Плоскость Y		Плоскость Z	
	Контрольный	Опытный	Контрольный	Опытный	Контрольный	Опытный
1	2	3	4	5	6	7
Пористость, %	2,123	1,206	1,623	1,461	1,46	1,3
Радиус, мкм	124,6	105,3	108,0	92,7	82,5	87,6

На основе анализа результатов компьютерной рентгеновской томографии контрольных и опытных образцов углепластика установлена средняя пористость, соответственно, 1,7 и 1,3 %. Средний поперечный размер пор составил 105 и 95 мкм.

Это свидетельствует о снижении средней пористости в опытных образцах на 24 % и среднего размера пор – на 10 %. Данный факт с учетом выше приведенных о связи пористости ПКМ с прочностью [6] подтверждает возможность значимого повышения данного параметра ПКМ и, соответственно, качества сформированных изделий.

Полученные результаты являются обоснованием механизма повышения физико-механических характеристик ПКМ в результате их СВЧ обработки на определенных технологических режимах [12–14]. Повышение количества фрагментов матрицы и сокращение расстояния между ними и армирующими волокнами способствует росту количества армирующих волокон, вовлеченных в процесс восприятия нагрузки, и позволяет увеличить прочность и жесткость изделий из ПКМ.

Введение СВЧ обработки применительно к конечному изделию в качестве финишной упрочняющей операции исключает возможное влияние последующих обработок на полученные параметры структуры и позволяет повысить качество изделий из ПКМ различного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.
2. Дориомедов, М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) / М. С. Дориомедов // Труды ВИАМ. – 2020. – № 6–7. – С. 29–37.
3. Диков, И. А. Классификация дефектов в 2D-армированных полимерных композиционных материалах (обзор) / И. А. Диков, С. И. Яковлева, А. С. Бойчук [и др.] // Труды ВИАМ. – № 3 (121), 2023. – С. 67–83.
4. Гайдачук, А. В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов / А. В. Гайдачук, А. В. Кондратьев, Е. В. Омеленченко // Авиационно-космическая техника и технология. – № 3/70, 2010. – С. 11–20.
5. Душин, М. И. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ / М. И. Душин, К. И. Донецкий, Р. Ю. Караваев // Труды ВИАМ. – № 6 (42), 2016. – С. 68–78.
6. Бугаков, И. С. Расчетно-экспериментальная оценка несущей способности многослойных композиционных конструкций летательных аппаратов с учетом внутренних дефектов, определенных компьютерным томографом : дис... канд. техн. наук: 05.07.03 – прочность и тепловые режимы летательных аппаратов / Бугаков Игорь Сергеевич. – Казань, 2006. – 171 с.
7. Злобина, И. В. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле на изменение изгибной прочности конструктивных элементов из отвержденных углепластиков под действием факторов внешней среды / И. В. Злобина, И. С. Кацуба, Н. В. Бекренев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 20–22.
8. Злобина, И. В. О механизме повышения механических характеристик отвержденных полимерных композиционных материалов под действием СВЧ электромагнитного поля / И. В. Злобина, Н. В. Бекренев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 158–169.

Статья поступила в редакцию 02.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 02.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 621-039-419; 620.22-419
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-36-39

Научная статья
Original article

И. В. Злобина^{1,2}, Н. В. Бекренев¹

**ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГРАММЫ ПАРЕТО ДЛЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СВЧ
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

¹ Саратовский государственный технический университет
имени Ю. А. Гагарина, г. Саратов, Россия

² НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

✉ Ирина Владимировна Злобина, irinka_7_@mail.ru

Аннотация. В статье изложены результаты анализа дефектов в полимерных композиционных материалах (ПКМ) с использованием диаграммы Парето с целью выявления направленности их упрочняющей обработки в СВЧ электромагнитном поле и уточнения объектов приложения данного технологического метода. В качестве критерия построения диаграммы предложено использовать распределение дефектов по частоте упоминания в научно-технической литературе, посвященной исследованию свойств ПКМ и производственным проблемам их изготовления.

Ключевые слова: изделия из полимерных композиционных материалов, эксплуатационные и технологические дефекты, диаграмма Парето, распределение, технология упрочняющей обработки, СВЧ электромагнитное поле

Для цитирования: Злобина И. В., Бекренев Н. В. Применение диаграммы Парето для выбора параметров СВЧ упрочняющей обработки изделий из полимерных композиционных материалов. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 36–39. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-36-39

Информация об авторах:

Николай Валерьевич Бекренев – профессор, д-р техн. наук, кафедра «Техническая механика и мехатроника», Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина

РИНЦ AuthorID: 271817

e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru

Ирина Владимировна Злобина – канд. техн. наук, кафедра «Техническая механика и мехатроника», Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина

РИНЦ AuthorID: 686083

e-mail: irinka_7_@mail.ru

Вклад авторов:

Н. В. Бекренев – определение цели работы, исследование микроструктуры, участие в обсуждении результатов.

И. В. Злобина – написание статьи, проведение экспериментов.

I. V. Zlobina^{1,2}, N. V. Bekrenev¹

**APPLICATION OF THE PARETO DIAGRAM FOR SELECTING PARAMETERS
OF MICROWAVE STRENGTHENING TREATMENT
OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

¹ Yuri Gagarin Saratov state technical University, Saratov, Russia

² Kurchatov Institute, Moscow, Russia

✉ Irina V. Zlobina, irinka_7_@mail.ru

Abstract. The article presents the results of the analysis of defects in polymer composite materials (PCMs) using a Pareto chart in order to identify the direction of their strengthening processing in a microwave electromagnetic field and to specify the objects of application of this technological method. As a criterion for constructing the chart, it is proposed to use the distribution of defects according to the frequency of their mention in the scientific and technical literature devoted to the study of the properties of PCMs and the production problems of their manufacture.

Keywords: polymer composite materials, operational and technological defects, Pareto chart, distribution, strengthening treatment, and microwave electromagnetic field

For citation: Zlobina I. V., Bekrenev N. V. Application of the Pareto diagram for selecting parameters of microwave strengthening treatment of polymer composite materials. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 36–39. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-36-39

Information about the authors:

Nikolai V. Bekrenev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Saratov State Technical University. Gagarina Yu.A.

RSCI AuthorID: 271817

e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru

Irina V. Zlobina – Candidate of Technical Sciences, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Saratov State Technical University. Gagarina Yu.A.

RSCI AuthorID: 686083

e-mail: irinka_7_@mail.ru

Contribution of the authors:

Nikolai V. Bekrenev – definition of the purpose of the work, study of the microstructure, participation in the discussion of the results.

Irina V. Zlobina – writing articles, conducting experiments.

Качественный конструкционный композиционный материал, как и любой другой, должен удовлетворять комплексу требований. При этом эксплуатационные требования имеют первостепенное значение. Для того чтобы обеспечить работоспособность конкретных машин и приборов, материал должен иметь высокую конструкционную прочность.

Поскольку композиционный материал технологически создается одновременно с изготовлением изделия [1], появляется возможность для комплексного решения многих вопросов конструирования, формообразования и обработки изделия, которые совмещены уже на стадии инженерного проектирования объекта производства. Происходит смыкание и совмещение конструкторско-технологических задач инженерного проектирования и производства композитных конструкций. Известно [2–5], что специфика технологии, включающей пропитку армирующих структур связующим с последующим его отверждением при нормальных температурах или при нагревании, а также операции последующей размерной обработки (например, крепежных отверстий) и сборки приводят к образованию различных дефектов, оказывающих впоследствии влияние на эксплуатационные свойства изделия. Одним из эффективных методов модификации ПКМ для снижения влияния дефектов является воздействие на отвержденные ПКМ СВЧ электромагнитным полем [6]. Для практического внедрения данной технологии и обоснования, как технологических схем, так и режимов обработки, важно определить с одной стороны дефекты в ПКМ, которые наиболее эффективно могут быть устранены (минимизированы) данным методом, а с другой стороны – соотнести их со степенью опасности и частотой проявления в процессе эксплуатации технических систем.

В соответствии с изложенным, целью исследований было определено выявление и уточнение объектов приложения технологического метода упрочняющей СВЧ обработки с целью повышения качества изделий.

В настоящее время предложена достаточно обширная и полная классификация дефектов и причин их образования на разных стадиях жизненного цикла изделия [7–9], из которых объективно, как объекты упрочнения, может быть выделена группа технологических дефектов, т. е. появляющихся, как следствие несовершенства или нарушения технологического процесса изготовления изделия. При этом все дефекты распределяются по семи группам опасности [7, 9]: **1-я группа:** низкая (менее 95 %) степень отверждения, отклонения в составе композита по объему компонентов; **2-я группа:** расслоения; **3-я группа:** трещины; **4-я группа:** локальные зоны с повышенным содержанием волокна или матрицы, поры; **5-я группа:** складки, свили, раковины, включения, подмятия, стыки и нахлесты; **6-я группа:** сколы, надрезы, отверстия, как концентраторы напряжений; **7-я группа:** искривление волокон в плоскости слоев.

Для статистического анализа причин какой-либо проблемы с целью ее устранения достаточно удобно использовать построение диаграммы Парето [10], сущность которой заключается в отсеке из рассмотрения 20 % малозначущих по частоте проявления факторов, что сокращает трудоемкость планируемых мероприятий. Анализируя по данной методике распространение эксплуатационных дефектов, приведенное в [2, 4], следует отметить, что в область важных дефектов, которые необходимо устранять, попадают только трещины, относимые к 3 группе опасности, остальные дефекты, лежащие в области (0–80) %, относятся

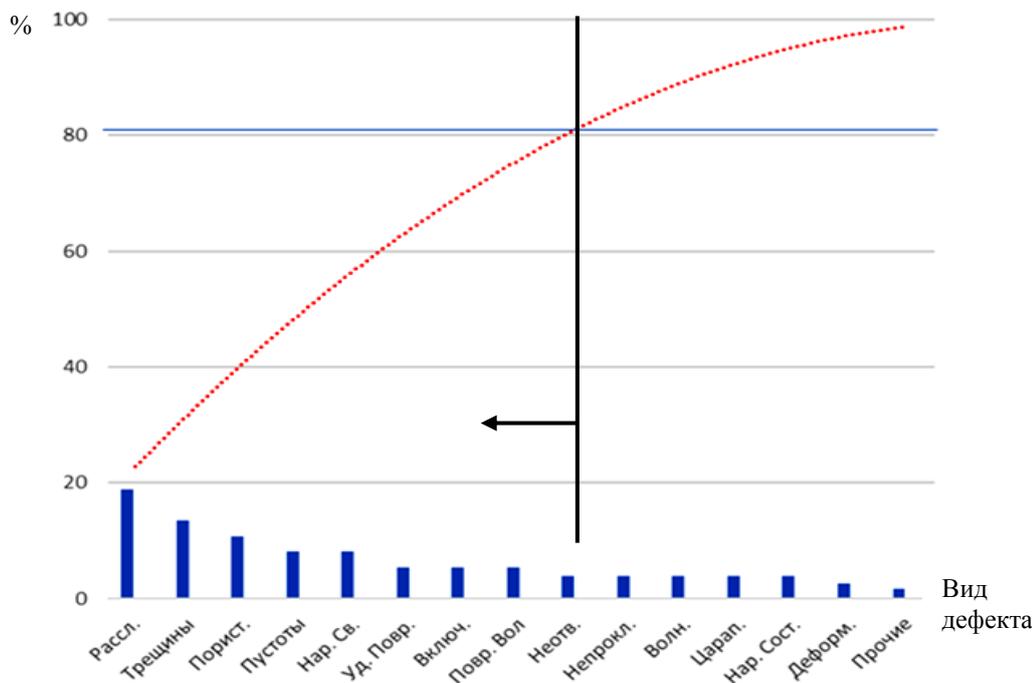
к 4–6-й группам опасности, т. е. их устранение не является достаточно критичным. В то же время весьма опасные (2-я группа) дефекты типа расслоения (непроклеи) на основе анализа эксплуатации ПКМ попадают в «не актуальные» для исследования и устранения 20 %, а относящиеся к 1-й группе опасности (неполное отверждение и отклонения в составе компонентов) попадают в категорию «прочие».

В связи с изложенным проведен повторный анализ дефектов с принятием в качестве критерия частоты упоминания в научных публикациях. На основе рассмотрения 42 публикаций отечественных и зарубежных исследователей за период с 2000 по 2025 гг. установлено, что значительная часть дефектов, относящихся к высоким категориям опасности, широко отражается в научных публикациях, что подтверждает повы-

шенное внимание к необходимости решения проблемы снижения их негативного влияния.

Для обоснования объекта и предмета исследований по разработке рациональных эффективных технологий СВЧ упрочнения изделий из ПКМ с использованием результатов анализа построена диаграмма Парето (рисунок), на основании которой установлено, что в область 80 %, ограничивающую важные для решения задачи, входят дефекты, отнесенные к группам опасности – 2, 3, 4. При этом на границе данной области находится дефект, относящийся к 1-й – наивысшей группе.

Суммируя результаты проведенного анализа, можно сделать следующие выводы, определяющие направление исследований параметров разработки технологии СВЧ упрочнения изделий из ПКМ.



Распределение дефектов в ПКМ в форме диаграммы Парето

1. В большей части известных дефектов причинами их появления являются: неполное отверждение связующего; неравномерный (участками) контакт связующего с волокном; остаточные напряжения, вызванные термическими деформациями компонентов в процессе формирования и отверждения вследствие различных коэффициентов термического расширения волокон и матрицы, вызывающие появление трещин в области контакта матрицы и волокон, раковин и пустот в матрице, а также микропор.

2. Уменьшить долю таких дефектов и их от-

рицательное влияние возможно путем временного перевода матрицы в пластичное состояние с одновременным стимулированием ее перераспределения в межволоконном пространстве, что обеспечит уменьшение непроклеев за счет увеличения точек контакта матрицы и волокна, а также повышение плотности матрицы в межслоевом пространстве за счет уменьшения несплошностей.

3. В конечном итоге центрами проявления факторов, приводящих к возникновению большинства дефектов, относящихся к группам

особой опасности для ПКМ, является адгезионное взаимодействие компонентов в области контакта «матрица-волокно».

Таким образом, основная задача разработки технологии СВЧ упрочнения изделий из ПКМ может быть сформулирована, как повышение адгезионного взаимодействия в области «матрица-волокно» и когезионного межслоевого взаимодействия на финишной стадии процесса изготовления изделия из ПКМ после завершения отверждения связующего за счет увеличения поверхности контакта компонентов и плотности материала путем воздействия СВЧ электромагнитного поля на режимах, вызывающих временный переход матрицы в область размягчения при нагреве до определенной температуры, что будет способствовать активизации конфигурационных изменений в межфазном слое и формированию новых точек контактного взаимодействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – 2-е изд. / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.
2. Saboktakin, A. 3D textile preforms and composites for aircraft structures: a review // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace. 2019. Vol. 6. Is. 1. Art. 2. P. 1–41. DOI: 10.15394/ijaaa.2019.1299
3. Katunin A., Dragan K., Dziendzikowski M. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques // Composite Structures. 2015. Vol. 127. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.080.
4. Mehdi khani M., Gorbatikh L., Verpoest I., Lomov S.V. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance // Journal of Composite Materials. 2018. Vol. 53. Is. 12. P. 1–91.
5. Душин, М. И. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ / М. И. Душин, К. И. Донецкий, Р. Ю. Караваев // Труды ВИАМ. № 6 (42), 2016. – С. 68–78.
6. Злобина, И. В. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле на изменение изгибной прочности конструктивных элементов из отвержденных углепластиков под действием факторов внешней среды / И. В. Злобина, И. С. Кацуба, Н. В. Бекренев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 20–22.
7. Диков, И. А. Классификация дефектов в 2D-армированных полимерных композиционных материалах (обзор) / И. А. Диков, С. И. Яковлева, А. С. Бойчук [и др.] // Труды ВИАМ. – № 3 (121), 2023. – С. 67–83.
8. Гайдачук, А. В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов / А. В. Гайдачук, А. В. Кондратьев, Е. В. Омельченко // Авиационно-космическая техника и технология. – № 3/70, 2010. – С. 11–20.
9. Мурашов, В. В. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов / В. В. Мурашов, А. Ф. Румянцев // Контроль. Диагностика. – № 4, 2007.
10. Кох, Р. Принцип 80/20 / Р. Кох ; пер. с англ. – М. : Эксмо, 2012. – 448 с.

Статья поступила в редакцию 02.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025
The article was submitted 02.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 658.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-39-42

Научная статья

Original article

С. Капарушкин, О. А. Макарова

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЛУЧШЕНИЮ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Сергей Капарушкин, kaparuskinsergey4@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются практические рекомендации по совершенствованию систем менеджмента качества в рамках работы машиностроительных предприятий. Проанализированы характерные проблемы отрасли, и предложены конкретные меры по повышению эффективности системы менеджмента качества. Особое внимание уделено внедрению цифровых технологий и интеграции принципов бережливого производства.

Ключевые слова: система менеджмента качества, машиностроение, бережливое производство, цифровизация, эффективность производства

Для цитирования: Капарушкин С., Макарова О. А. Рекомендации по улучшению системы менеджмента качества на предприятиях машиностроительной отрасли. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 39–42. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-39-42

Информация об авторах:

Сергей Капарушкин – магистр кафедры ТМС, ВолгГТУ

e-mail: kaparuskinsergey4@gmail.com

Ольга Александровна Макарова – доцент канд. техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ

orcid.org/0000-0003-2672-136x

e-mail: olgamakarova5024@gmail.com

Вклад авторов:

С. Капарушкин – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

О. А. Макарова – определение цели работы, составление статьи, участие в обсуждении результатов.

S. Kaparushkin, O. A. Makarova

**RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING THE SYSTEM QUALITY
MANAGEMENT IN ENTERPRISES ENGINEERING INDUSTRY**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Sergey Kaparushkin, kaparuskinsergey4@gmail.com

Abstract. The article discusses practical recommendations for improving quality management systems in the context of machine-building enterprises. The characteristic problems of the industry are analyzed and specific measures are proposed to improve the efficiency of the quality management system. Special attention is paid to the implementation of digital technologies and the integration of lean production principles.

Keywords: quality management system, machine-building, lean production, digitalization, production efficiency

For citation: Kaparushkin S., Makarova O. A. Recommendations for improving the quality management system at enterprises of the machine-building industry. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 39–42. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-39-42

Information about the authors:

Sergey Kaparushkin – Magister Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: kaparuskinsergey4@gmail.com

Olga A. Makarova – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

orcid.org/0000-0003-2672-136x

e-mail: olgamakarova5024@gmail.com

Contribution of the authors:

Sergey Kaparushkin – processing and analysis of research results, writing the text of the article

Olga A. Makarova – determined the purpose of the work, writing an article, participated in the discussion of the results.

Введение

Современные машиностроительные предприятия функционируют в условиях жесткой конкуренции, особенно в рамках импортозамещения, что требует постоянного совершенствования систем менеджмента качества (далее СМК). Особенностью отрасли является сложность производственных процессов, многономенклатурность продукции и высокие требования к точности изготовления. Эффективность СМК становится ключевым фактором конкурентоспособности машиностроительных предприятий.

Актуальность темы подтверждается данными Росстата: только 35 % машиностроительных предприятий России имеют полностью функционирующую СМК, соответствующую международным стандартам. При этом предприятия с сертифицированной СМК демонстриру-

ют на 25 % более высокие показатели производительности [1].

**Результаты исследования
и их обсуждение**

С помощью проведенного анализа деятельности машиностроительных предприятий, авторы смогли выявить типичные проблемы в области управления качеством, а именно:

- формальный подход к документированию процессов (68 % предприятий),
- недостаточная автоматизация контроля качества (72 %),
- отсутствие интеграции СМК с операционной деятельностью (64 %),
- неэффективная система мотивации персонала (63 %),
- устаревшие методы статистического контроля процессов (45 %) [1, 3, 4, 5].

Особую проблему представляет разрыв между формальным наличием сертификата соответствия ISO 9001:2015 или национального аналога Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 9001–2015 и реальными процессами управления качеством. На многих предприятиях СМК функционирует как обособленная система, не интегрированная в основные бизнес-процессы.

В качестве рекомендаций авторами предложены следующие действия:

1. Внедрение цифровых технологий в управление качеством. Рекомендуется создание единой цифровой платформы управления качеством, интегрированной с САД (computer-aided design – система автоматизированного проектирования) / САМ (computer-aided manufacturing – система автоматизированного изготовления) / САЕ (computer-aided engineering – система автоматического анализа проекта).

Это позволит реализовать:

- автоматический сбор данных с контрольно-измерительного оборудования;
- прогнозирование качества на этапе проектирования;
- сквозную прослеживаемость продукции.

Например, внедрение системы статистического контроля процессов производства на основе машинного обучения на ОАО «Волгоградский тракторный завод» позволило снизить количество дефектов на 23 % [3, 5]. В настоящее время, правопреемником завода является «Тракторная компания «ВгТЗ», находящаяся в составе концерна «Тракторные заводы». Производственные мощности завода перенесены на ОАО «Промтрактор» г.Чебоксары, где производится полный производственный цикл по сборке тракторов Агромаш 90ТГ. В Волгограде на площадке предприятия под эгидой «Ростеха» действующим остается лишь спецпроизводство для оборонного заказа.

2. Интеграция принципов бережливого производства. Целесообразно изучить и внедрить методологию «шести сигм», которая включает в себя:

- визуализацию для процессов качества;
- систему организации и рационализации рабочего места (5S);
- метод Кайдзен для непрерывного улучшения.

В среднем внедрение карт потоков создания ценности позволит сократить время контроля качества на 35 % [1, 6, 7].

3. Совершенствование системы мотивации персонала. Для совершенствования системы

мотивации персонала необходимо разработать модель ключевых показателей эффективности, связанную с показателями качества, например:

- процент соответствия спецификациям;
- количество предложений по улучшениям;
- соблюдение стандартов работы.

Внедрение системы мотивации может повысить вовлеченность персонала на 40 % [7].

4. Оптимизация процессов управления несоответствиями. Рекомендуется внедрение автоматизированной системы управления корректирующими и предупреждающими действиями. Такая система может включать:

- электронный журнал несоответствий;
- автоматизированный процесс устранения дефектов [2, 5].

5. Развитие компетенций персонала. Развитие можно осуществить посредством непрерывного обучения персонала, которое может включать:

- курсы по статистическим методам контроля;
- тренинги по работе с измерительным оборудованием;
- обучение принципам бережливого производства.

Реализация предложенных авторами рекомендаций позволит машиностроительным производствам достичь следующих результатов:

- снижение затрат на качество на 15–20 %;
- увеличение производительности на 12–15 %;
- сокращение времени выпуска продукции на 18–22 %;
- повышение уровня удовлетворенности клиентов на 20–25 % [1].

Выводы

Предложенные рекомендации по совершенствованию СМК позволят машиностроительным предприятиям перейти от формального соответствия положениям стандартов к созданию эффективной системы управления качеством. Ключевыми факторами успеха являются интеграция цифровых технологий, внедрение принципов бережливого производства и развитие компетенций персонала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения : 03.09.2025).
2. Современные проблемы машиностроения : материалы науч.-практ. конф. (Томск, 25–29 ноября 2024 г.). – Томск : Изд-во ОмШ ИШНПТ ТПУ, 2024. – 345 с.

3. Официальный сайт ОАО «Волгоградский тракторный завод». – URL : <https://vgtz-traktor.ru> (дата обращения : 03.09.2025).

4. Официальный сайт ОАО «Волгограднефтемаш». – URL : <https://www.vnm.ru> (дата обращения : 03.09.2025).

5. Материалы международной специализированной выставки «Автоматизация.2024». – URL : <https://automa->

[tion-expo.ru/exhibition/about](https://automa-tion-expo.ru/exhibition/about) (дата обращения 05.09.2025).

6. Вумек, Д. П. Бережливое производство. Как избежать потерь и добиться процветания вашей компании / Д. П. Вумек, Д. Т. Джонс ; пер. с англ. – 2-е изд. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2005. – 473 с.

7. Исикава, К. Японские методы управления качеством / К. Исикава. – Москва : Экономика, 1988. — 199 с.

Статья поступила в редакцию 15.11.2025, доработана 23.12.2025, подписана в печать 24.12.2025

The article was submitted 15.11.2025, revised 23.12.2025, accepted for publication 24.12.2025

УДК 621.867.2:681.6:004.356

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-42-45

Научная статья

Original article

А. А. Кожевникова, К. Р. Федорова, Д. А. Русанов, А. Д. Гришков

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЛЕНТОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР ДЛЯ ВОЗМОЖНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЙ 3D-ПЕЧАТИ НА FDM 3D-ПРИНТЕРАХ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Ксения Романовна Федорова, ks_fedorova@icloud.com

Аннотация. Данная статья посвящена разработке универсального ленточного конвейера для установки на разные виды принтеров. В ней представлена схема конвейера и описано его устройство. Также представлена многоуровневая система управления универсальным ленточным конвейером в совокупности с 3D-принтером, построенная по иерархическому принципу.

Ключевые слова: ленточный конвейер, 3D-печать, 3D-принтер

Для цитирования: Кожевникова А. А., Федорова К. Р., Русанов Д. А., Гришков А. Д. Универсальный ленточный конвейер для возможности непрерывной 3D-печати на FDM 3D-принтерах. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 42–45. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-42-45

Информация об авторах:

Алла Александровна Кожевникова – старший преподаватель кафедры ТМС, ВолгГТУ

e-mail: a_kozhevnikova@vstu.ru

Ксения Романовна Федорова – студент кафедры ТМС, ВолгГТУ

e-mail: ks_fedorova@icloud.com

Даниил Артемович Русанов – студент кафедры ТМС, ВолгГТУ

e-mail: danilka_rusanov@mail.ru

Андрей Дмитриевич Гришков – студент кафедры ТМС, ВолгГТУ

e-mail: andrey.grishkov@yandex.ru

Вклад авторов:

А. А. Кожевникова – формирование научной концепции исследования, руководство разработкой конструкции универсального ленточного конвейера, научное редактирование текста статьи.

К. Р. Федорова – сбор и анализ информации по существующим решениям, разработка структурной схемы системы управления, подготовка текста статьи и иллюстративных материалов.

Д. А. Русанов – участие в проектировании узлов конвейера, построение схемы устройства и его элементов, анализ функциональных особенностей модели.

А. Д. Гришков – разработка схемы взаимодействия конвейера и 3D-принтера, описание алгоритмов работы уровней системы управления, участие в обсуждении и оформлении результатов.

A. A. Kozhevnikova, K. R. Fedorova, D. A. Rusanov, A. D. Grishkov

UNIVERSAL CONVEYOR BELT FOR CONTINUOUS 3D PRINTING ON FDM 3D-PRINTERS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Ksenia R. Fedorova, ks_fedorova@icloud.com

Abstract. This article is devoted to the development of a universal conveyor belt for installation on different types of printers. It presents a diagram of the conveyor and describes the device of the machine. A multi-level control system for a universal conveyor belt in conjunction with a 3D printer, built on a hierarchical principle, is also presented.

Keywords: conveyor belt, 3D printing, 3D printer

For citation: Kozhevnikova A. A., Fedorova K. R., Rusanov D. A., Grishkov A. D. Universal conveyor belt for continuous 3D printing on FDM 3D printers. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1 (308) 42–45. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-42-45

Information about the authors:

Alla A. Kozhevnikova – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU
e-mail: a_kozhevnikova@vstu.ru

Ksenia R. Fedorova – student Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU
e-mail: ks_fedorova@icloud.com

Daniil A. Rusanov – student Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU
e-mail: danilka_rusanov@mail.ru

Andrey D. Grishkov – student Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU
e-mail: andrey.grischkov@yandex.ru

Contribution of the authors:

Alla A. Kozhevnikova – formation of the scientific concept of the study, management of the design of the universal belt conveyor, scientific editing of the text of the article.

Ksenia R. Fedorova – collection and analysis of information on existing solutions, development of a structural diagram of the management system, preparation of article text and illustrative materials.

Daniil A. Rusanov – participation in the design of the components of the pipeline, construction of the circuit diagram and its elements, analysis of the functional features of the model.

Andrey D. Grishkov – development of a diagram of the interaction between the conveyor and the 3D printer, description of the algorithms for operation of the levels of the control system, participation in the discussion and presentation of the results.

Введение

3D-печать является одним из ключевых направлений цифрового производства, обеспечивающее оперативный вывод новой продукции на рынок. Данная технология позволяет в сжатые сроки изготавливать объекты высокой конструкционной сложности, создание которых в условиях традиционного производства требует значительных трудозатрат.

Благодаря этому 3D-печать приобретает широкую востребованность среди производителей различной номенклатуры изделий. Однако, несмотря на значительные преимущества технологии, ее широкое внедрение в серий-

ное производство сопровождается рядом ограничений.

Одной из основных проблем серийного производства в 3D-печати является невозможность сделать его непрерывным. Это означает, что за готовностью каждой единицы изделия необходимо постоянно следить и в дальнейшем вручную перезапускать производственный цикл.

Материалы и методы исследования

На рис. 1 представлена разработка китайского производителя 3D принтеров. Его недостатком является то, что конвейер, установленный на данном принтере не применим к другим моделям.



Рис. 1. Разработка китайской компании «CREALITY»

Устройство универсального ленточного конвейера для 3D-принтера. На рис. 2 представлена схема универсального ленточного конвейера для 3D-принтера. Универсальный ленточный конвейер включает в себя: ленту 1, которую поддерживают в рабочем состоянии роликоопоры верхние 2 и нижние 9, являющиеся составной частью става конвейера, натяжной барабан 5 и натяжное устройство 7 выполняют функцию компенсации удлинения ленты 1, которая в ходе длительной эксплуатации будет растягиваться, в качестве привода выполняющего основную работу выступают шаговый двигатель 3 и приводной барабан 4, отверстия 6 служат для установки закрепляющего устройства конвейера

вместо печатного стола, отклоняющие барабаны 8. Рабочая поверхность на которой выполняется печать (лента) состоит из материала с высокой степенью адгезии и нагревающего элемента с утеплителем проходящими по всей площади ленты. Данное устройство дает возможность печатать не только неограниченное количество деталей на плоскости, но и нестандартно длинные детали. Вышеописанное достижение выполняется посредством передвижения ленты на определенное расстояние с последующим продолжением печати на свободном месте в случае изготовления новой детали или продолжением печати с места, где она была прервана в случае изготовления длинных деталей.

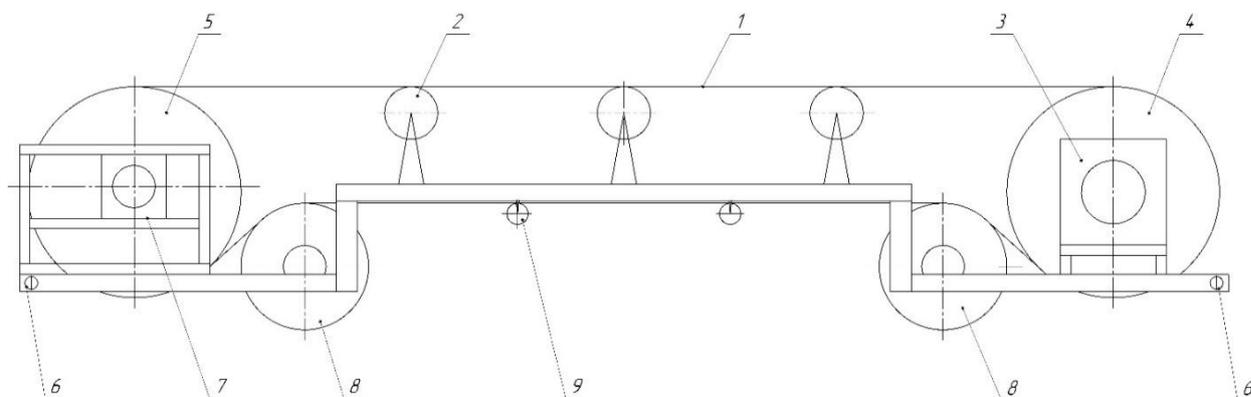


Рис. 2. Схема универсального ленточного конвейера для 3D-принтера

Система управления. На рис. 3 представлена структурная схема системы управления конвейерной лентой в совокупности с 3D-принтером. Она построена по иерархическому принципу и делится на 3 уровня:

- 1) супервизорный;
- 2) верхний;
- 3) нижний.

В супервизорный уровень системы управления комбайна входит пульт управления на основе персонального устройства. На этом уровне осуществляется работа оператора, посредством персонального устройства даются команды системе, а также просматриваются данные с датчиков.

Верхний уровень системы управления включает в себя системы алгоритмов движения, анализа и преобразования информации, выдачи управляющих команд.

Данные с датчиков, а также от оператора обрабатываются системой анализа и преобразования информации. На основе полученного результата решаются задачи: движения экструдера и конвейера.

Нижний уровень системы управления включает в себя экструдер и конструкцию конвейера, включенную в 3D-принтер. Управляющие команды конвейера и экструдера получают с верхнего уровня.

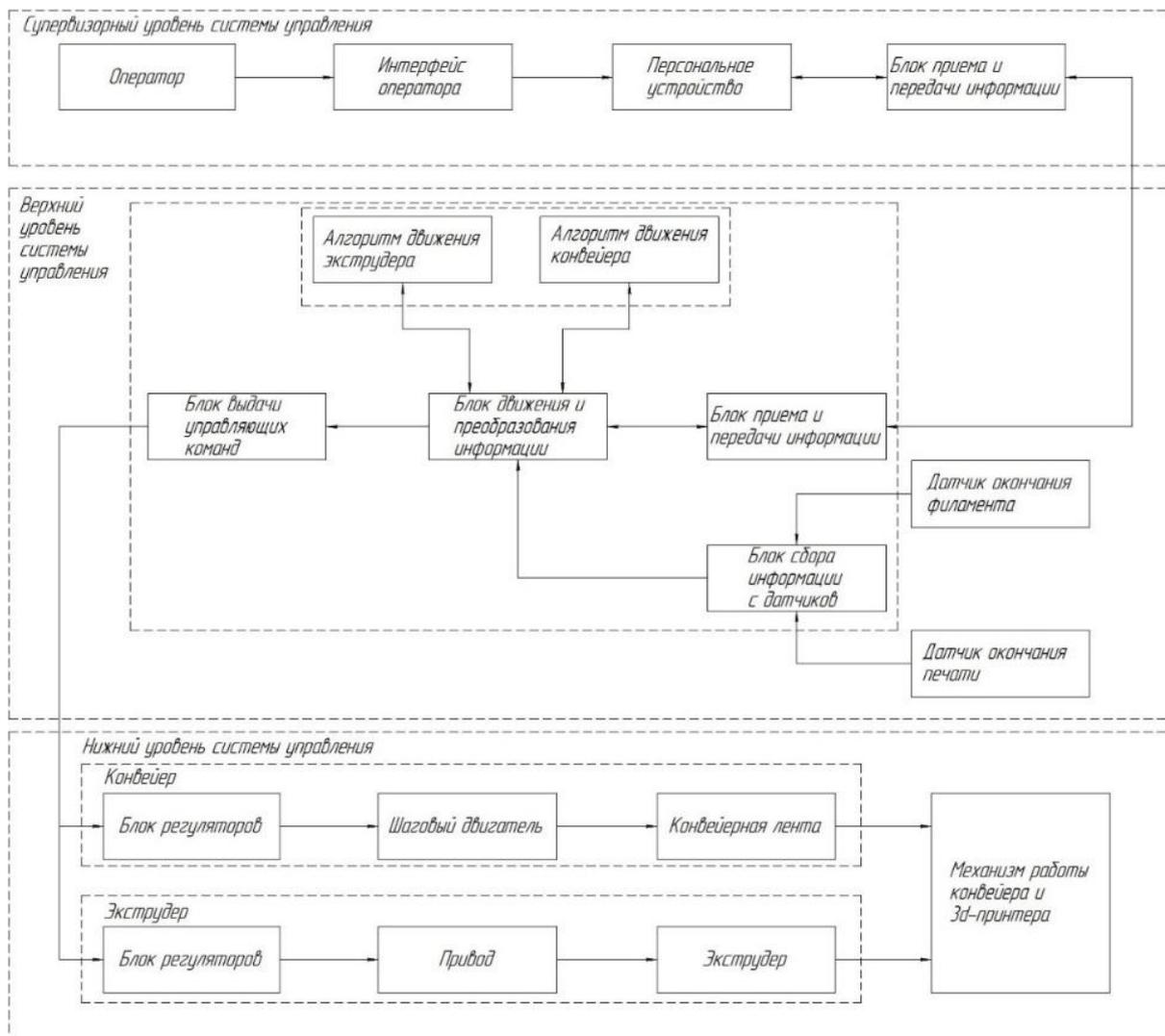


Рис. 3. Структурная схема управления ленточным конвейером и 3D-принтером

Выводы

3D-печать является эффективным инструментом для развития промышленного сектора, обеспечивающая возможность оперативного изготовления изделий различного уровня сложности. Однако, в современных условиях существует ряд ограничений, связанных с трудностями организации многосерийного непрерывного производства, что формирует потребность в разработке специализированных устройств и решений, способных вывести процессы аддитивного производства (3D-печать) на новый уровень.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кривошеев, Д. Ю. Конвейерный 3D-принтер: конструкция, назначение и перспективы применения в про-

мышленности / Д. Ю. Кривошеев // Современные проблемы машиностроения : сб. ст. XVI Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 27 ноября – 01 декабря 2023 года. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 85–86.

2. Михайлова, О. М. Перспективы развития систем автоматизации по контролю работы 3D-принтеров на базе различных технологий / О. М. Михайлова, В. В. Ковалева, Д. А. Пономаренко // Молодой ученый. – 2021. – № 27(369). – С. 60–62.

3. Патент на полезную модель № 216676 U1 Российская Федерация, МПК В29С 64/245, В29С 64/40, В33У 30/00. Стол построения для печати методом послойного наплавления (FDM) 3D-принтера конвейерной компоновки : № 2022105228 : заявл. 28.02.2022 : опубл. 17.02.2023 / И. С. Басалов, А. С. Гуляев, Д. А. Шорохов ; заявитель общество с ограниченной ответственностью «САЙРЕС».

4. Creality 3DPrintMill / CR-30 // Creality URL: <https://creality-print.ru/creality-3dprintmill-3d-printer> (дата обращения: 04.12.2025).

Статья поступила в редакцию 02.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 02.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 631.372:621.9.027
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-46-49

Научная статья
Original article

А. А. Кожевникова, К. Р. Федорова, Д. А. Русанов, А. Д. Гришков

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ,
ЗУБЧАТЫХ И ВОЛНИСТЫХ РЕЖУЩИХ СЕГМЕНТОВ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Ксения Романовна Федорова, ks_fedorova@icloud.com

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния формы режущей кромки сегментов косилки на износостойкость и эффективность резания. Рассмотрены прямолинейные, зубчатые и предложенные волнистые сегменты с переменным распределением усилий. Проведен эксперимент с анализом износа и расчетом площади потерянного материала.

Ключевые слова: режущий сегмент, износ режущей кромки, площадь износа

Для цитирования: Кожевникова А. А., Федорова К. Р., Русанов Д. А., Гришков А. Д. Сравнительный анализ прямолинейных, зубчатых и волнистых режущих сегментов. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 46–49. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-46-49

Информация об авторах:

Алла Александровна Кожевникова – старший преподаватель кафедры ТМС, ВолгГТУ

e-mail: a_kozhevnikova@vstu.ru

Ксения Романовна Федорова – студент кафедры ТМС, ВолгГТУ

e-mail: ks_fedorova@icloud.com

Даниил Артемович Русанов – студент кафедры ТМС, ВолгГТУ

e-mail: danilka_rusanov@mail.ru

Андрей Дмитриевич Гришков – студент кафедры ТМС, ВолгГТУ

e-mail: andrey.grischkov@yandex.ru

Вклад авторов:

А. А. Кожевникова – формирование научной концепции исследования, руководство разработкой конструкции, научное редактирование текста статьи.

К. Р. Федорова – сбор и анализ информации по существующим решениям, подготовка текста статьи и иллюстративных материалов.

Д. А. Русанов – участие в проектировании узлов, построение схемы устройства и его элементов, анализ функциональных особенностей модели.

А. Д. Гришков – участие в проектировании узлов, построение схемы устройства и его элементов, анализ функциональных особенностей модели.

A. A. Kozhevnikova, K. R. Fedorova, D. A. Rusanov, A. D. Grishkov

**COMPARATIVE ANALYSIS OF STRAIGHT, SERRATED,
AND WAVY CUTTING SEGMENTS**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Ksenia R. Fedorova, ks_fedorova@icloud.com

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of mower segment cutting edge geometry on wear resistance and cutting efficiency. Straight, serrated, and the newly proposed wavy segments with variable force distribution were considered. An experimental study was conducted, including wear analysis and calculation of the lost material area.

Keywords: cutting segment, cutting edge wear, wear area

For citation: Kozhevnikova A. A., Fedorova K. R., Rusanov D. A., Grishkov A. D. Comparative analysis of straight, serrated, and wavy cutting segments. Izvestiya VSTU, 2026, 1 (308): 46–49. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-46-49

Information about the authors:

Alla A. Kozhevnikova – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: a_kozhevnikova@vstu.ru

Ksenia R. Fedorova – student Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: ks_fedorova@icloud.com

Daniil A. Rusanov – student Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: danilka_rusanov@mail.ru

Andrey D. Grishkov – student Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

e-mail: andrey.grischkov@yandex.ru

Contribution of the authors:

A. A. Kozhevnikova – formation of the scientific concept of the study, scientific editing of the text of the article.

K. R. Fedorova – collection and analysis of information on existing solutions, preparation of article text and illustrative materials.

D. A. Rusanov – participation in the design of the components, construction of the circuit diagram and its elements, analysis of the functional features of the model.

A. D. Grishkov – participation in the design of the components, construction of the circuit diagram and its elements, analysis of the functional features of the model.

Введение

Повышение эффективности процесса скашивания растений зависит от совершенствования рабочих органом режущих аппаратов, а в частности от формы и качества режущей кромки сегментов. Привычные для нас технологии покоса сталкиваются с проблемой интенсивного износа режущих элементов, что снижает производительность и повышает затраты на уборку.

В современных реалиях особую актуальность приобретает поиск альтернативных решений, позволяющих увеличить долговечность режущих сегментов при сохранении или повышении качества резания. Один из направлений совершенствования является оптимизация формы режущей кромки режущего сегмента.

Материалы и методы исследования

Материалы и методы исследования

В настоящее время на сельскохозяйственных аппаратах наиболее распространены сегменты с зубчатой и прямолинейной режущими кромками. Они обеспечивают стабильное качество реза при достаточной простоте изготовления. В рамках исследования предложена новая геометрия режущей кромки режущего сегмента – волнистая форма. Главным ее преимуществом является чередование локальных выступов и впадин, которые создают переменное усилие резания по длине кромки.



Рис. 1. Внешний вид зубчатых, прямолинейных и волнистых режущих сегментов

Такая форма способствует более эффективному срезанию стеблей растения и препятствует забиванию растительными остатками режущего полотна косилки. На рис. 1 представлен внешний вид зубчатых, прямолинейных и волнистых режущих сегментов.

Для сравнительной оценки режущих способностей трех типов сегментов был проведен эксперимент при одинаковых эксплуатационных условиях. Каждый вид сегмента был установлен на одно режущее полотно косилки, что обеспечило идентичность режимов и параметров резания. На рис. 2 представлено полотно с установленными на него режущими сегментами.

Для сравнительной оценки режущих способностей трех типов сегментов был проведен эксперимент при одинаковых эксплуатационных условиях. Каждый вид сегмента был установлен на одно режущее полотно косилки, что обеспечило идентичность режимов и параметров резания. На рис. 2 представлено полотно с установленными на него режущими сегментами.



Рис. 2. Полотно с установленными на него режущими сегментами

В ходе экспериментальных работ была выполнена обработка участка площадью 1,04 Га, который включает в себя различные по жесткости и структуре виды растений. Такая площадь обработки позволила объективно оценить износостойкость каждого типа сегмента. После завершения испытаний сегменты были демонтированы и исследованы с использованием оптического микроскопа Norgau NVM – II 2010 D для определения профиля износа.

Для каждого вида режущих сегментов были получены профили до начала работы и после

окончания обработки участка, показанного на рис. 3.

Затем выполнено совмещение профилей, позволяющее определить площадь критического и постепенного износа волнистых и прямолинейных режущих сегментов, как показано на рис. 4 и 5.

Такой подход обеспечивает высокую точность количественной оценки деградации рабочей поверхности и позволяет объективно сравнивать долговечность различных геометрических решений режущей кромки режущих сегментов.



Рис. 3. Карта обработанных территорий в ходе эксперимента

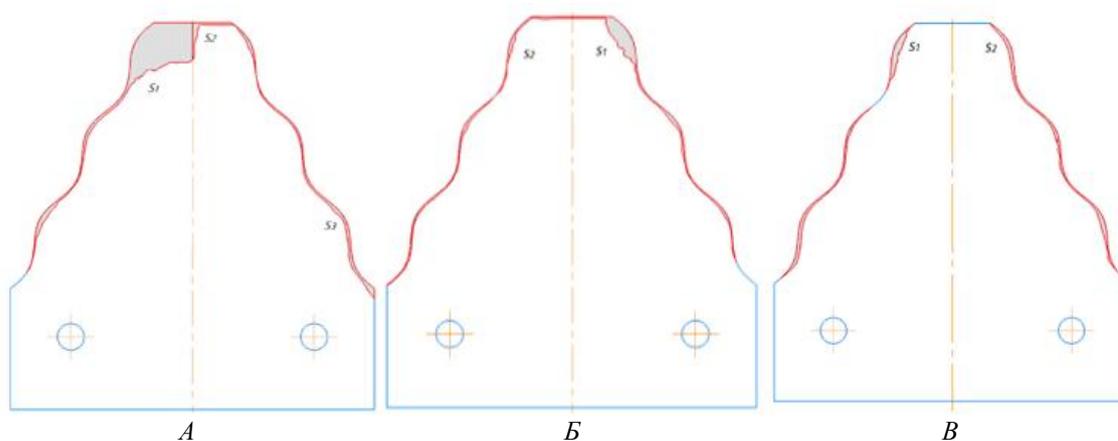


Рис. 4. Совмещенные профили волнистых режущих сегментов до и после испытаний

Волнистый режущий сегмент «А» показал наибольший критический и постепенный износы. Площадь критического износа $S_{1A} = 131,44 \text{ мм}^2$, а участки постепенного износа показали следующие значения $S_{2A} = 12,98 \text{ мм}^2$ и $S_{3A} = 23,86 \text{ мм}^2$, а суммарная площадь износа режущего сегмента равна $\sum S_i = 168,28 \text{ мм}^2$.

Волнистый режущий сегмент «Б» показал промежуточный результат по площади износа.

Площадь его критического износа $S_{1B} = 43,55 \text{ мм}^2$, а участок постепенного износа равен $S_{2B} = 20,84 \text{ мм}^2$, а суммарный износ составил $\sum S_i = 64,39 \text{ мм}^2$.

Лучший результат показал волнистый режущий сегмент «В». Критический износ отсутствует, а площади постепенного износа равны $S_{1B} = 26,77 \text{ мм}^2$ и $S_{2B} = 14,29 \text{ мм}^2$, суммарный износ составил $\sum S_i = 41,06 \text{ мм}^2$.

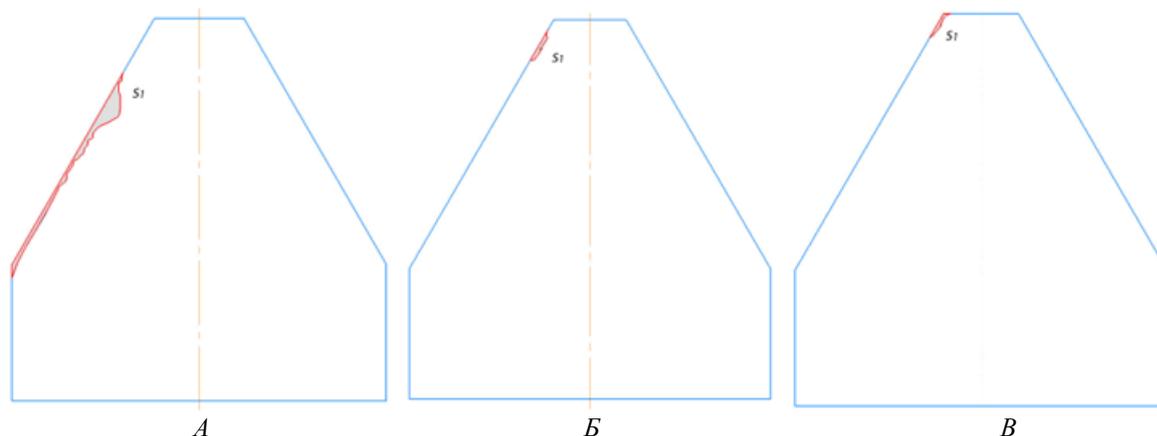


Рис. 5. Совмещенные профили прямолинейных режущих сегментов до и после испытаний

Прямолинейные режущие показали следующие суммарной площади износа, прямолинейный режущий сегмент «А» $S_A = 48,05 \text{ мм}^2$, прямолинейный режущий сегмент «Б» $S_B = 4,70 \text{ мм}^2$, прямолинейный режущий сегмент «В» $S_B = 3,17 \text{ мм}^2$.

В ходе эксперимента, зубчатые режущие сегменты показали наилучший результат среди представленных. Анализ зубчатых режущих сегментов показал, что критический и постепенный износы отсутствуют на них.

Выводы

Наибольший критический и постепенный износы выявлены у волнообразных сегментов, что указывает на их низкую износостойкость и необходимость доработки конструкции и технологии упрочнения. Гладкие режущие сегменты показали средний результат износа, местами с проявлением критических повреждений, что требует регулярного контроля их состояния. Наиболее износостойкими оказались зубчатые режущие сегменты, для которых кри-

тический износ не был зафиксирован, подтверждая их эффективность в условиях скашивания трав различной жесткости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение нанокмпозиционного никелирования для упрочнения режущих элементов уборочных машин / П. А. Горбушин, В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, С. А. Мандров // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. XXXVI Междунар. науч.-техн. конф. им. В. В. Михайлова, Саратов, 17–18 мая 2023 года. – Саратов : Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, 2023. – С. 281–288.
2. Алдошин, Н. В. Совершенствование конструкции сегментно-пальцевых режущих аппаратов / Н. В. Алдошин, А. А. Золотов, Н. А. Лылин // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 6(73). – С. 46–53.
3. Крупин, А. Е. Повышение износостойкости режущих элементов сельскохозяйственных уборочных машин / А. Е. Крупин // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 10(17). – С. 42–47.
4. Видеоизмерительная система NORG AU Industrial модель NVM П-2010D / [Электронный ресурс] // NORG AU : [сайт]. – URL: <https://norgau.com/products/tn288667/> (дата обращения: 04.12.2025).

УДК 691.175.3, 620.174
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-50-53

Научная статья
Original article

Ф. К. Салех, М. П. Кухтик

ИСПЫТАНИЯ ИЗГИБНОЙ ПРОЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С АРМИРОВАНИЕМ НЕПРЕРЫВНЫМ УГЛЕВОЛОКНОМ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Михаил Петрович Кухтик, m_kukhtik@vstu.ru

Аннотация. Рассмотрена технология аддитивного изготовления пластмассовых зубчатых колес с армированием непрерывным углеволокном для повышения их прочности. Описаны особенности проектирования геометрии зубчатых элементов, выбор материалов и параметров FDM-печати, а также формирование траекторий размещения углеродного волокна в программном обеспечении Stereotech. Приведены технологические параметры процесса печати и результаты испытаний образцов на изгиб, позволяющие оценить влияние армирования на механические характеристики изделий. Установлено, что применение непрерывного углеродного волокна обеспечивает значительное увеличение прочности по сравнению с неармированными образцами, что подтверждает эффективность предлагаемого подхода для изготовления зубчатых передач.

Ключевые слова: пластмассовые зубчатые колеса; аддитивные технологии; FDM-печать; непрерывное армирование; углеродное волокно

Для цитирования: Салех Ф. К., Кухтик М. П. Испытания изгибной прочности зубчатых колес с армированием непрерывным углеволокном. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 50–53. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-50-53

Информация об авторах:

Фиделис Коелех Салех – аспирант кафедры АПП, ВолгГТУ

orcid.org/0009-0008-1389-8987

e-mail: lkoeleh@gmail.com

Михаил Петрович Кухтик – доцент, канд. техн. наук, кафедра АПП, ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-7258-6624

e-mail: m_kukhtik@vstu.ru

Вклад авторов:

Ф. К. Салех – концепция исследования, проведение экспериментальных исследований (испытания на изгиб), обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

М. П. Кухтик – редактирование текста рукописи, оформление рукописи, утверждение окончательной версии статьи.

F. K. Salekh, M. P. Kukhtik

BENDING STRENGTH TESTS OF GEARS WITH CONTINUOUS CARBON FIBER REINFORCEMENT

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Mikhail P. Kukhtik, m_kukhtik@vstu.ru

Abstract. The technology of additive manufacturing of plastic gears using continuous carbon reinforcement to increase their flexural strength is described. The features of designing the geometry of gear elements, the choice of materials and parameters of FDM printing, as well as the formation of carbon fiber placement paths in the Stereotech software are described. The technical conditions for the implementation of the printing process and the results of bending tests of samples are presented, which make it possible to assess the effect of reinforcement on the mechanical characteristics of products. It has been established that the use of continuous carbon fiber provides a significant increase in strength compared to non-reinforced samples, which confirms the effectiveness of the proposed approach for manufacturing functional elements of gears.

Keywords: plastic gears; additive technologies; FDM printing; continuous reinforcement; carbon fiber

For citation: Salekh F. K., Kuhtik M. P. Testing the Bending strength of gears reinforced with continuous carbon fiber. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 50–53. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-50-53

Information about the authors:

Fidelis K. Saleh – Postgraduate student Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0009-0008-1389-8987

e-mail: lkoeleh@gmail.com

Mikhail P. Kukhtik – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0002-7258-6624

e-mail: m_kukhtik@vstu.ru

Contribution of the authors:

Fidelis K. Saleh – research concept, conducting experimental studies (bending tests), processing and analysis of research results, writing the text of the article

Mikhail P. Kukhtik – editing the manuscript text, formatting the manuscript, approval of the final version of the article.

Введение

Пластмассовые зубчатые колеса широко применяют в современных механизмах благодаря их легкости, низкому уровню шума, коррозионной стойкости и способности работать без смазки. Однако их основной недостаток – недостаточная прочность и износостойкость по сравнению с металлическими аналогами. Одним из способов повышения их прочности является армирование углеродным волокном, особенно с использованием технологии непрерывного армирования, при которой волокна располагают вдоль силовых линий в наиболее нагруженных зонах [1–3].

Процесс проектирования

Проектирование пластиковых зубчатых колес с непрерывным армированием углеволокном включает несколько основных этапов: сначала определяется передаточное отношение, тип зацепления и рабочие нагрузки, затем выполняется расчет ключевых параметров шестерни – модуля, числа зубьев, диаметра и ширины венца (рис. 1). После этого создается трехмерная модель в CAD-системе и экспортируется

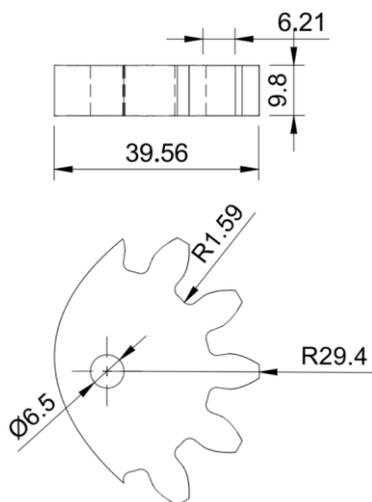


Рис. 1. Схема опытной модели сектора колеса

в формате STL в программу подготовки печати STE Slicer, где задается схема укладки углеволокна, ориентированного вдоль направлений максимальных напряжений для упрочнения зубьев в наиболее нагруженных областях. На заключительном этапе выполняется анализ напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов с последующей корректировкой конструкции для достижения оптимальных прочностных характеристик.

Процесс подготовки к печати в STE Slicer

Подготовка модели к 3D-печати выполнялась в программной среде Stereotech Slicer, предназначенной для 5D/3D-принтера с технологией армирования непрерывным углеволокном: модель зубчатого колеса импортировалась в формате STL и ориентировалась на рабочей платформе так, чтобы минимизировать количество поддержек и обеспечить оптимальное направление укладки армирующего волокна в зоне зубьев.

В Stereotech Slicer задавались следующие параметры печати:

- толщина слоя – 0,2 мм, что обеспечивает достаточную точность формирования зубчатого профиля;
- температура экструдера – 260 °С (для полиамида PA6);
- температура стола – 90 °С для надежного сцепления первого слоя;
- заполнение – 50 % для снижения массы при сохранении прочности;
- скорость печати – 40 мм/с;
- схема армирования – непрерывное укладывание углеволокна вдоль линий основных нагрузок в основании зубьев колеса.

Материалы и обоснование их выбора

В качестве основного материала применялся полиамид PA6, обладающий высокой износостойкостью, стабильностью размеров и хорошей адгезией с углеродным волокном. Он со-

храняет прочность при повышенных температурах и вибрациях, что делает его подходящим для зубчатых передач. В отдельных случаях использовался модифицированный полиамид PA+CF, повышающий жесткость и снижающий деформации. В качестве армирующего материала применялось непрерывное углеродное волокно с высокой прочностью и малой плотностью. Оно эффективно воспринимает растяжение и снижает риск разрушения зубьев.

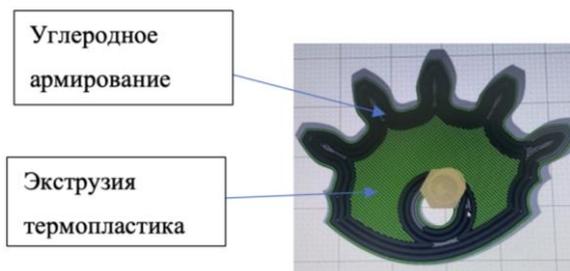


Рис. 2. Визуализация траекторий печати и непрерывного армирования углеродным волокном

В Stereotech Slicer отображаются траектории печати термопластика и укладки непрерывного углеволокна, которое размещается в наиболее нагруженных зонах зубчатого колеса (рис. 2).

Такая стратегия позволяет усилить зубья там, где возникают максимальные напряжения, обеспечивая значительно более высокую жесткость, устойчивость к деформациям и износостойкость по сравнению с обычной печатью без армирования.

Процесс испытаний

Процесс изгибных испытаний армированной шестерни показан на рис. 3, включающем схему теста и реальный стенд, где образец нагружается между опорами для создания изгибающего момента. Такой метод позволяет оценить эффективность армирования волокном путем исследования изгибной прочности зубьев колес передач.

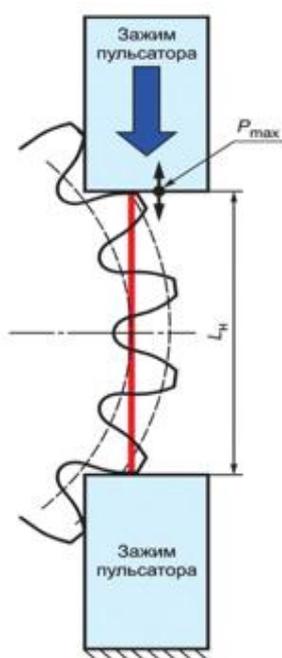
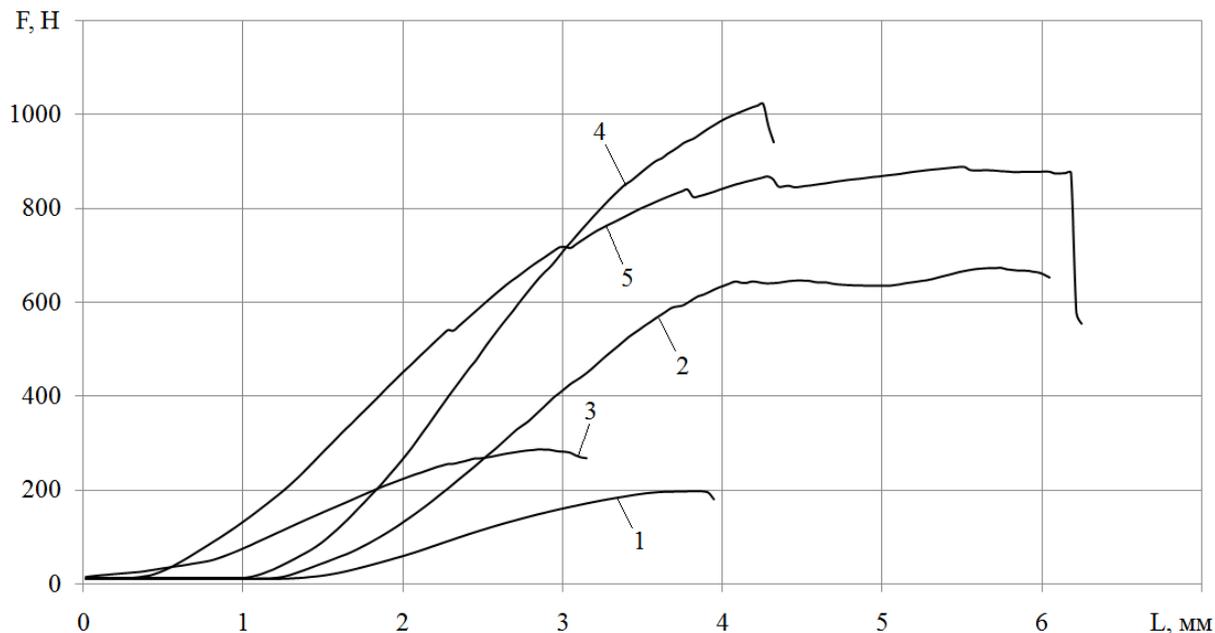


Рис. 3. Испытания зубьев пластмассового зубчатого колеса на изгиб:
 P_{max} – расчетная динамическая нагрузка; L_n – длина общей нормали зубчатого колеса

Результаты испытаний

На рисунке 4 представлены результаты испытаний на изгиб образцов из полиамида PA+CF. Здесь кривая 1 соответствует образцу с одним слоем непрерывного армирования волокнами с сетчатым рисунком заполнения, 2 – образцу

с двумя слоями армирования с линейным рисунком, 3 – образцу с тремя боковыми слоями армирования с концентрическим рисунком, 4 – образцу с четырьмя слоями армирования с концентрическим рисунком, 5 – образцу с пятью слоями армирования с концентрическим рисунком.

Рис. 4. Зависимость нагрузки F от прогиба L

Основной вывод состоит в том, что непрерывное углеродное волокно значительно повышает изгибную жесткость всех исследованных пластиков, особенно мягких материалов, у которых прогиб снижается в 3–5 раз. Это позволяет компенсировать их исходную гибкость и превращает даже эластичные полимеры в конструкционно надежные элементы. В результате армированные зубчатые колеса лучше сохраняют форму под нагрузкой и обладают большей долговечностью по сравнению с неармированными.

Выводы

Расчетные данные показывают, что образцы с непрерывным углеродным волокном значительно превосходят неармированные по изгибной прочности и жесткости. Армирующие элементы эффективно воспринимают растягивающие нагрузки и повышают сопротивление упругим деформациям. Армированные зубчатые колеса демонстрируют меньший прогиб и повышенную структурную стабильность. Аддитивное изготовление с непрерывным армирова-

нием существенно улучшает механические характеристики деталей. Результаты испытаний позволяют оптимизировать армирование, параметры печати и выбор материалов для функциональных зубчатых передач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Салех, Ф. К. Методика и оборудование для испытаний на прочность пластиковых зубчатых колес с армированием / Ф. К. Салех, А. А. Яковлев, И. С. Торубаров // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (298) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2025. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 81–84. – DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-81-84.
2. Бочкарев, Е. С. Армированные углеволокном композиционные материалы, полученные по технологии FDM / Е. С. Бочкарев, А. В. Дроботов, И. С. Торубаров, А. Н. Дынин, О. О. Тужиков, М. А. Ваниев // Пластические массы. – 2025. – № 2. – С. 16–19. – DOI: 10.35164/0554-2901-2025-02-16-19.
3. Торубаров, И. С. Прочность на изгиб 3D-печатных изделий, армированных непрерывным углеволокном / И. С. Торубаров, А. В. Дроботов, А. М. Макаров, М. П. Кухтик // Научные технологии в машиностроении. – 2025. – № 10 (172). – С. 23–30. – DOI: 10.30987/2223-4608-2025-10-23-30.

УДК 621.787.4
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-54-58

Научная статья
Original article

Ю. И. Сидякин, С. Ю. Абакумова, С. Н. Ольштынский, А. Г. Минаева

**РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ЗАДАЧАХ С УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИМ КОНТАКТОМ ТЕЛ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Алена Георгиевна Минаева, minaevaal2000@mail.ru

Аннотация. Предложена методика расчета интенсивности остаточных напряжений в пластически деформированной области под остаточным отпечатком с эллиптическим контуром. Установлено, что ее максимальные значения не превышают повышенного наклепом предела текучести материала и приходятся на уровень, составляющий 0,2...0,4 относительной глубины наклепа, что соответствует экспериментальным данным для окружных и осевых остаточных напряжений в упрочненном обкаткой поверхностном слое валов. Расчет выполнен с использованием программного комплекса «Mathcad-7».

Ключевые слова: упругопластическая контактная деформация, интенсивность напряжений, остаточные напряжения

Для цитирования: Сидякин Ю. И., Абакумова С. Ю., Ольштынский С. Н., Минаева А. Г. Расчет интенсивности остаточных напряжений в задачах с упругопластическим контактом тел. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 54–58. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-54-58

Информация об авторах:

Юрий Иванович Сидякин – профессор, д-р техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ

orcid.org/0009-0006-6418-4170

e-mail: y_sidyakin@mail.ru

Светлана Юрьевна Абакумова – инженер, ВолгГТУ

e-mail: lighta_06@mail.ru

Сергей Николаевич Ольштынский – доцент, канд. техн. наук, кафедра ТМС, ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-6030-5725

e-mail: for_lead22@mail.ru

Алена Георгиевна Минаева – аспирант кафедры ТМС, ВолгГТУ

orcid.org/0009-0005-7388-6986

e-mail: minaevaal2000@mail.ru

Вклад авторов:

Ю. И. Сидякин – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

С. Ю. Абакумова – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

С. Н. Ольштынский – определение цели работы, составление статьи, участие в обсуждении результатов.

А. Г. Минаева – обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Yu. I. Sidyakin, S. Yu. Abakumova, S. N. Olshtynsky, A. G. Minaeva

**CALCULATION OF RESIDUAL STRESS INTENSITY IN PROBLEMS
INVOLVING ELASTOPLASTIC CONTACT OF BODIES**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Alyona G. Minaeva, minaevaal2000@mail.ru

Abstract. The method for calculating the intensity of residual stresses in the plastically deformed region beneath a residual elliptical indentation is proposed. It is established that the maximum values do not exceed the material's yield strength increased by work hardening and occur at a level corresponding to 0.2 to 0.4 of the relative depth of the work-hardened zone, which agrees with experimental data for circumferential and axial residual stresses in the surface layer of shafts hardened by rolling with rollers. The calculation was performed using the Mathcad-7 software suite.

Keywords: elastoplastic contact deformation, stress intensity, residual stresses

For citation: Sidyakin Yu. I., Abakumova S. Yu., Olshtynsky S. N., Minaeva A. G. Calculation of residual stress intensity in problems invol elastoplastic contact of bodies. Izvestiya VSTU, 2026, 1 (308): 54–58. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-54-58

Information about the authors:

Yuri I. Sidyakin – Professor, doctor of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

orcid.org/0009-0006-6418-4170

e-mail: y_sidyakin@mail.ru

Svetlana Yu. Abakumova – engineer, VSTU

e-mail: lighta_06@mail.ru

Sergey N. Olshtynsky – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

orcid.org/0000-0002-6030-5725

e-mail: for_lead22@mail.ru

Alyona G. Minaeva – Postgraduate student Department of Mechanical Engineering Technology, VSTU

orcid.org/0009-0005-7388-6986

e-mail: minaevaal2000@mail.ru

Contribution of the authors:

Yuri I. Sidyakin – determined the purpose of the work, participated in the discussion of the results.

Svetlana Yu. Abakumova – processing and analysis of research results, writing the text of the article.

Sergey N. Olshtynsky – determined the purpose of the work, writing an article, participated in the discussion of the results.

Alyona G. Minaeva – processing and analysis of research results, writing the text of the article.

Введение

При выполнении операций поверхностного пластического деформирования (ППД) валов, проводимых для повышения их пределов выносливости, одной из важнейших задач является создание в упрочненном поверхностном слое благоприятной системы сжимающих остаточных напряжений (ОН), способствующих сдерживанию процессов зарождения и развития усталостных трещин [1, 2]. Не менее важным является и контроль этих напряжений, который осуществляется в основном трудоемкими экспериментальными методами и связан, как правило, с разрушением готовых деталей. Поэтому при назначении технологических режимов упрочняющей обработки валов, в частности, обкаткой их роликами (или шариками), особенно востребованной будет методика расчетного прогнозирования этих напряжений с возможностью получения в поверхностном слое валов требуемой по условиям эксплуатации системы сжимающих ОН как по их интенсивности σ_i^o , так и по отдельным ее компонентам, включая осевые σ_x^o , окружные (тангенциальные) σ_t^o и радиальные σ_r^o ОН. А для этого нужны надежные аналитические методы расчета ОН.

Материалы и методы исследования

Предпринимаемые в последнее время попытки создания приемлемой для практического использования методики расчетного прогнозирования и контроля ОН в валах после ППД пока не дали желаемого результата, и это несмотря на накопленную обширную эксперимен-

тальную базу данных по ОН в сплошных и полых валах [1–3]. Имеющиеся результаты отдельных частных исследований по этой тематике носят большей частью приближенный характер и не охватывают решение проблемы в целом. Это относится и к нашей работе [4], в которой аналитическое решение по ОН построено на использовании степенной аппроксимации обобщенной диаграммы деформирования, что делает решение не полностью аналитическим, и к тому же оно не объясняет причин установленного экспериментально «спада» окружных и осевых ОН в упрочненном слое вблизи поверхности. Поэтому решение [4] нуждается в доработке, связанной с определением интенсивности ОН.

Согласно теоретическим исследованиям И. А. Биргера [5], одной из причин возникновения ОН следует считать несовпадение физических процессов (или законов) нагружения тел и последующей упругой разгрузки. В полной мере это относится и к силовому контакту обкатных инструментов с валом в процессах ППД, которые сопровождаются упругопластической контактной деформацией, приводящей, как показано в работах [6,7], к перераспределению давления на контактной поверхности. Это давление, в отличие от чисто упругого на начальной стадии деформирования и при разгрузке, где принимается эллиптический закон его распределения с максимумом p_o в центре контакта, который в полтора раза превышает среднее значение $p_{cp} = F/\pi ab$, переходит при развитой упругопластической деформации в почти

равномерное с небольшим максимумом p'_0 в центре (рис. 1).

Согласно расчетам [8], превышение Δp над средним давлением p_{cp} , которое оценивается выражением

$$\Delta p/p_{cp} = (p'_0 - p_{cp})/p_{cp} = 0,25\varepsilon_d, \quad (1)$$

для углеродистых и легированных сталей средней твердости составляет менее 8 %. Здесь $\varepsilon_d = d/D_{ш} = d_{np}/D_{np} = 2\sqrt{ab}/D_{np}$ – степень деформации в отпечатках с круговым контуром диаметром d и эквивалентным ему эллиптическим с большой a и малой b полуосями, введенная в рассмотрение И. В. Кудрявцевым [2]; F – контактная нагрузка (сила обкатки); $D_{ш}$ и D_{np} – диаметр шара и равнозначный ему по физическому смыслу приведенный диаметр поверхностей контактирующих тел, зависящий только от их формы и геометрических размеров в точке сопряжения [6, 7]. Заметим, что поправка к среднему давлению до величины расчетного значения будет еще меньше и составит

$$\Delta p' = \frac{\Delta p}{2} \left(1 + \frac{\Delta p^2}{3ab} \right) \approx \frac{\Delta p}{2}. \quad (2)$$

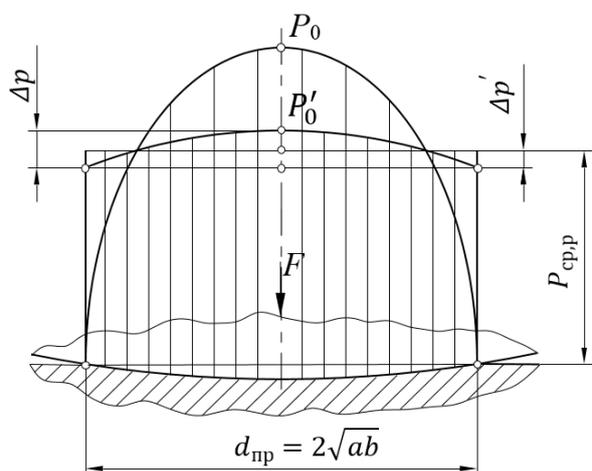


Рис. 1. Схема к определению среднего расчетного давления $p_{cp,p}$ на поверхности контакта при активном нагружении

Таким образом, при разработке аналитического решения по определению интенсивности

ОН в пластически деформированной области за расчетное среднее давление $p_{cp,p}$ при активном нагружении будем принимать

$$p_{cp,p} = (1 + \Delta p')p_{cp} = (1 + \Delta p/2)p_{cp} \approx (1 + 0,125\varepsilon_d)p_{cp}. \quad (3)$$

В расчетах интенсивности σ_i^o ОН будем использовать традиционный подход, т. е. определять σ_i^o по ее компонентам σ_x^o , σ_y^o и σ_z^o . Вначале это сделаем для единичной эллиптической контактной площадки в обычной системе координат, где оси x и y примем совпадающими соответственно с большой $2a$ и малой $2b$ осями ее контура, а ось z – с линией действия сжимающей контактной силы F . После этого, используя дифференциальное уравнение равновесия элемента в упрочненном поверхностном слое, как это сделано нами в работе [4], можно перейти к определению σ_x^o , σ_y^o и σ_r^o ОН в валах на любом уровне z (или $\bar{z} = z/z_s$) в пределах толщины z_s упрочненного слоя.

Компоненты интенсивности ОН определим как разности соответствующих напряжений $\sigma_x(z)$, $\sigma_y(z)$ и $\sigma_z(z)$, возникающих в очаге деформации в различных точках оси z на этапах активного нагружения (им присвоим индекс «н») и последующей упругой разгрузки (у них будет индекс «р»), используя рассмотренные выше законы распределения давлений по поверхности контакта для каждого из этих этапов. При расчете напряжений воспользуемся известными решениями, полученными на основе классической контактной задачи Буссинеска [9] применительно к плоским контактным площадкам с эллиптическим контуром [10]. Эти решения в интегральной форме при равномерном и эллиптическом законах распределения давления p уже использовались нами в работах [6, 7] при исследовании формы и границ очага деформации и расчете глубины наклепа z_s . Так, согласно [8], для этапа активного нагружения (при $\bar{p} = \bar{p}_{cp,p} = p_{cp,p}/\sigma_T$) искомые относительные напряжения после ряда упрощений определяются следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_x^H(z) &= \frac{\sigma_x^H(z)}{\sigma_T} = -\frac{(1+2\mu)\bar{p}_{cp,p}}{2} - \frac{2\bar{p}_{cp,p}}{\pi} \int_0^{0,5\pi} \left\{ (1-2\mu) \left[f_1(z, \varphi) + \ln \frac{f_1(z, \varphi) + 1}{2f_1(z, \varphi)} \right] - f_2(z, \varphi) \sin^2 \varphi \right\} d\varphi, \\ \bar{\sigma}_y^H(z) &= \frac{\sigma_y^H(z)}{\sigma_T} = -\frac{(1+2\mu)\bar{p}_{cp,p}}{2} - \frac{2\bar{p}_{cp,p}}{\pi} \int_0^{0,5\pi} \left\{ (1-2\mu) \left[f_1(z, \varphi) + \ln \frac{f_1(z, \varphi) + 1}{2f_1(z, \varphi)} \right] - f_2(z, \varphi) \cos^2 \varphi \right\} d\varphi, \\ \bar{\sigma}_z^H(z) &= \frac{\sigma_z^H(z)}{\sigma_T} = \frac{2\bar{p}_{cp,p}}{\pi} \int_0^{0,5\pi} f_1^3(z, \varphi) d\varphi - \bar{p}_{cp,p}, \end{aligned} \right\} (4)$$

где угол φ отсчитывается от оси y , $f_1(z, \varphi) = \frac{z}{b} \left(\frac{1}{1 - (1 - \beta^2) \sin^2 \varphi} + \frac{z^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{2}}$,

$$f_2(z, \varphi) = 2(1 - 2\mu) \ln \frac{f_1(z, \varphi) + 1}{2f_1(z, \varphi)} + 2(2 - \mu) f_1(z, \varphi) - f_1^3(z, \varphi);$$

μ – коэффициент Пуассона и σ_T – предел текучести материала.

Аналогично находятся и относительные напряжения упругой разгрузки $\bar{\sigma}_x^p$, $\bar{\sigma}_y^p$ и $\bar{\sigma}_z^p$, для этого используем известные [1,10] уравнения этапа нагружения при давлении в центре контактной площадки $p_0 = 3F/(2\pi ab)$. Поскольку разгрузка – процесс упругого восстановления нагруженной поверхности, протекающий в обратном направлении при отсутствии внешней

силы, следует сохранить неизменными полученные при активном нагружении размеры контактной площадки, т. е. полуоси a и b ее контура. Методика определения этих параметров, включая глубину наклепа z_s , рассмотрена в работах [6,7]. Таким образом, компоненты интенсивности относительных ОН станут известными:

$$\bar{\sigma}_x^o = \bar{\sigma}_x^H - \bar{\sigma}_x^p, \quad \bar{\sigma}_y^o = \bar{\sigma}_y^H - \bar{\sigma}_y^p \quad \text{и} \quad \bar{\sigma}_z^o = \bar{\sigma}_z^H - \bar{\sigma}_z^p, \quad (5)$$

а с ними, согласно [9], и интенсивности относительных напряжений нагрузки $\bar{\sigma}_i^H(\bar{z})$, разгрузки $\bar{\sigma}_i^p(\bar{z})$ и остаточных напряжений $\bar{\sigma}_i^o(\bar{z})$:

$$\bar{\sigma}_i^H(\bar{z}) = 2^{-0,5} \sqrt{(\bar{\sigma}_x^H(\bar{z}) - \bar{\sigma}_y^H(\bar{z}))^2 + (\bar{\sigma}_y^H(\bar{z}) - \bar{\sigma}_z^H(\bar{z}))^2 + (\bar{\sigma}_z^H(\bar{z}) - \bar{\sigma}_x^H(\bar{z}))^2}, \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_i^p(\bar{z}) = 2^{-0,5} \sqrt{(\bar{\sigma}_x^p(\bar{z}) - \bar{\sigma}_y^p(\bar{z}))^2 + (\bar{\sigma}_y^p(\bar{z}) - \bar{\sigma}_z^p(\bar{z}))^2 + (\bar{\sigma}_z^p(\bar{z}) - \bar{\sigma}_x^p(\bar{z}))^2}, \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}_i^o(\bar{z}) = \bar{\sigma}_i^H(\bar{z}) - \bar{\sigma}_i^p(\bar{z}) = 2^{-0,5} \sqrt{(\bar{\sigma}_x^o(\bar{z}) - \bar{\sigma}_y^o(\bar{z}))^2 + (\bar{\sigma}_y^o(\bar{z}) - \bar{\sigma}_z^o(\bar{z}))^2 + (\bar{\sigma}_z^o(\bar{z}) - \bar{\sigma}_x^o(\bar{z}))^2}. \quad (8)$$

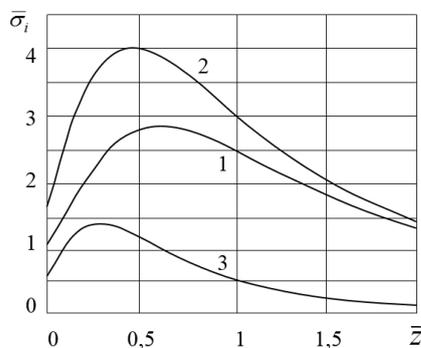


Рис. 2. Изменение интенсивностей относительных напряжений нагрузки (1), разгрузки (2) и ОН (3) по глубине $\bar{z} = z/z_s$ очага деформации для стали 50 (отжиг)

при $\bar{p}_{cp,p} = 4,4$

Для наглядности на рис. 2 представлены результаты расчетов величин $\bar{\sigma}_i^H(z)$, $\bar{\sigma}_i^p(z)$ и $\bar{\sigma}_i^o(z)$ в программного комплексе «Mathcad-7».

Расчеты производились для следующих условий: контакт тороидального ролика ($D_p = 45$ мм, радиус профиля $r = 3$ мм) с валом диаметром 90 мм из стали 50 ($\sigma_T = 315$ МПа), сила $F = 5$ кН; параметры очага деформации: $2a = 3,20$ мм, $2b = 1,43$ мм, $z_s = 2,35$ мм, $p_{cp,p}/\sigma_T = 4,4$.

Выводы

Полученные зависимости, описывающие характер изменения всех интенсивностей напряжений в очаге деформации на оси z , имеют максимум на глубинах порядка $(0,2...0,4)\bar{z}$. Согласно проведенным расчетам максимум основной зависимости $\bar{\sigma}_i^o(\bar{z})$ приходится на глубину $\bar{z}_m = 0,275$ и составляет величину $\sigma_i^o(\bar{z}_m) = 440$ МПа, достаточно близкую к повышенному вследствие наклепа пределу текучести материала вала $\sigma'_{T(z_m)} = 432$ МПа. Как будет установлено позднее с использованием решения [4], благодаря наличию этого экстремума на кривой $\bar{\sigma}_i^o(\bar{z})$ объясняется установленный экспериментально «спад» окружных и осевых остаточных напряжений в упрочненном обкаткой поверхностном слое валов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Браславский, В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В. М. Браславский. – М. : Машиностроение, 1975. – 160 с.
2. Исследования по упрочнению деталей машин / под

ред. И. В. Кудрявцева. – М. : Машиностроение, 1972. – 328 с.

3. Школьник, Л. М. Полюе оси и валы / Л. М. Школьник, Ю. Е. Коваленко, Н. И. Мартынов, Л. А. Усова. – М. : Машиностроение, 1968. – 184 с.

4. Сидякин, Ю. И. Аналитическое исследование остаточных напряжений в сплошных валах после упрочняющей обработки ППД / Ю. И. Сидякин, А. В. Трунин, С. Ю. Абакумова // Вестник машиностроения. – 2014. – № 6. – С. 62–70.

5. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.

6. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М. : Машиностроение. – 1986. – 224 с.

7. Сидякин, Ю. И. Определение формы и размеров пластически деформированной области вокруг отпечатка с эллиптическим контуром / Ю. И. Сидякин, А. П. Осипенко, А. В. Трунин, С. Ю. Сидякина // Вестник машиностроения, 2007, № 10. – С. 25–29.

8. Дрозд, М. С. Аналитическое исследование напряженного состояния при внедрении упругой сферы в упругопластическое полупространство / М. С. Дрозд, А. П. Осипенко // Металловедение и прочность материалов. – Волгоград, 1977. – С. 58–68.

9. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.

10. Расчеты на прочность в машиностроении / С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев, В. М. Макушин [и др.]. – М. : Машгиз, т. II, 1958. – 974 с; т. III, 1959. – 1118 с.

Статья поступила в редакцию 20.11.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 20.11.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 621.373.826:621.78+621.793

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-58-63

Научная статья

Original article

С. И. Ярьско¹, И. А. Антошин²

ИЗМЕРЕНИЕ ПОРИСТОСТИ КАРБИДОВОЛЬФРАМОВЫХ HVOF-ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

¹ Самарский филиал ФГБУН Физического института

им. П. Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

² ФГБОУ ВО «СамГТУ», Самара, Россия

✉ Сергей Игоревич Ярьско, serg19541959@mail.ru

Аннотация. После лазерной постобработки на различных режимах с помощью программного обеспечения «JMicroVision» на поперечных шлифах была отработана методика измерения и измерена пористость HVOF WC-10Co-4Cr покрытия толщиной 300 мкм, нанесенного на подложку из стали 38ХМА. Сделаны рекомендации по организации лазерной постобработки покрытий.

Ключевые слова: газотермическое покрытие, WC-10Co-4Cr, порообразование, лазерная обработка, коэффициент пористости

Для цитирования: Ярьско С. И., Антошин И. А. Измерение пористости карбидовольфрамовых HVOF-покрытий после лазерной обработки. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 58–63. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-58-63

Информация об авторах:

Сергей Игоревич Яреско – д-р техн. наук профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», СамГТУ, заведующий лабораторией Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.

orcid.org/0000-0001-5299-886X

e-mail: serg19541959@mail.ru

Илья Александрович Антошин – аспирант кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», СамГТУ.

orcid.org/0009-0006-0048-5935

e-mail: ilyaantoshin16@mail.ru

Вклад авторов:

С. . Яреско – концепция исследования, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, утверждение окончательной версии статьи.

И. А. Антошин – проведение экспериментальных исследований (металлографическое исследование, лазерная обработка), обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

S. I. Yaresko¹, I. A. Antoshin²

**MEASUREMENT OF THE POROSITY OF TUNGSTEN
CARBIDE HVOF COATINGS AFTER LASER TREATMENT**

¹Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute, Samara, Russia

²Samara State Technical University, Samara, Russia

✉ Sergey I. Yaresko, serg19541959@mail.ru

Abstract. After laser post-processing in various modes using «JMicroVision» software, the technique for measuring porosity was mastered and the porosity of HVOF WC-10Co-4Cr coatings with a thickness of 300 microns applied to a AISI 4140 steel substrate was measured across cross-sections. Recommendations are made on the organization of laser post-treatment for coatings.

Keywords: gas thermal coating, WC-10Co-4Cr, pore formation, laser treatment, overlap ratio

For citation: Yaresko S. I., Antoshin I. A. Measurement of porosity of tungsten carbide HVOF coatings after laser treatment. Izvestiya VGTU, 2026, 1(308): 58–63. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-58-63

Information about the authors:

Sergey I. Yaresko – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools, SamSTU, Head of the laboratory Samara Branch of P. N. Lebedev Physical Institute.

orcid.org/0000-0001-5299-886X

e-mail: serg19541959@mail.ru

I. A. Antoshin – postgraduate student at the Department of Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools, SamSTU.

orcid.org/0009-0006-0048-5935

e-mail: ilyaantoshin16@mail.ru

Contribution of the authors:

Sergey I. Yaresko – research concept, editing of the manuscript text, design of the manuscript, approval of the final version of the article.

Ilya A. Antoshin – conducting experimental studies (metallographic research, laser processing), processing and analyzing research results, writing the text of the article.

Введение

Высокая твердость и износостойкость карбидовольфрамовых HVOF покрытий подтверждена многочисленными исследованиями и трибоиспытаниями [1–3 и др.]. Однако при определенных условиях функционирования покрытия могут демонстрировать неудовлетворительные эксплуатационные характеристики. Для улучшения свойств газотермических покрытий целесообразно проводить их постобработку, например, с использованием лазерного излучения (ЛИ) [4, 5]. Дополнительная лазер-

ная обработка (ЛО) положительно сказывается на таких свойствах покрытия, как твердость, пористость, износостойкость, при этом отмечается, что при ЛО следует избегать перегрева покрытия [3, 4, 6], т.к. это приводит к увеличению его дефектности, ухудшению свойств, образованию пор, трещин, сколов и т.п. Снижение порообразования HVOF покрытий после ЛО имеет решающее значение для улучшения их трибологических характеристик.

При трибоконтакте наличие пор снижает прочность и твердость покрытия, обуславлива-

ет неравномерность износа контактирующих поверхностей [7]. При нагружении покрытия поры могут быть концентраторами напряжений, что приводит к возникновению очагов износа, последующему возникновению микротрещин, локальному разрушению и, как следствие, катастрофическому разрушению покрытия. В такой ситуации необходим тщательный контроль состояния покрытия, его пористости и твердости.

При трении покрытие должно обеспечивать высокую износостойкость по всей площади фрикционного контакта. В силу ограниченности ширины лазерного трека для выполнения этого условия необходимо на практике реализовать многопроходную ЛО с перекрытием соседних лазерных дорожек.

Анализ публикаций показывает, что большинство исследований в данной предметной области посвящено анализу влияния ЛИ на структуру, свойства, в том числе и пористость, покрытия при непрерывной однопроходной ЛО.

Цель работы – измерение пористости HVOF покрытий после лазерной постобработки с оплавлением при наличии перекрытия соседних треков (дорожек) ЛО, разработка рекомендаций по обеспечению минимизации пористости покрытий после многопроходной обработки с перекрытием.

Материалы и методы исследования

В экспериментах использовался непрерывный волоконный лазер MFSC 1000M-1500M фирмы MAXphotonics (Китай) максимальной мощностью 1,5 кВт. В качестве объекта исследу-

ований была выбрана сталь 38ХМА (подложка) с HVOF WC-10Co-4Cr покрытием толщиной 300 мкм. Во всех экспериментах мощность излучения (P) составляла 900 Вт. Скорость сканирования ЛИ (V) выбиралась равной 10, 20 и 30 мм/с. Металлографический анализ проводили с помощью растрового электронного микроскопа Jeol JSM 6390A. Пористость измерялась по фотографиям поперечных шлифов образцов с покрытием после лазерной постобработки с помощью программного обеспечения (ПО) «JMicroVision» с модулем «Background Extraction». Аналогичный метод использовался при измерении пористости HVOF WC-CrC-Ni покрытий с помощью ПО Adobe Photoshop CS2 и Image-Pro Plus 4.5 [2]. Суть метода состоит в реализации операции цветокоррекции изображения пор, которым присваивается определенный цвет, и расчете отношения измененного цвета, характеризующего поры, к общему количеству пикселей, попавших в поле зрения изображения. Полученное соотношение представляет количественную оценку пористости, в том числе и после ЛО. Данный способ измерения пористости более прост и доступен по сравнению с гидростатическим методом [8].

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследований была проведена ЛО с оплавлением поверхности образцов с покрытием одиночными дорожками при вариации скорости сканирования ЛИ (рис. 1). Основные элементы наблюдаемой на поперечном шлифе структуры показаны на рис. 1, в.

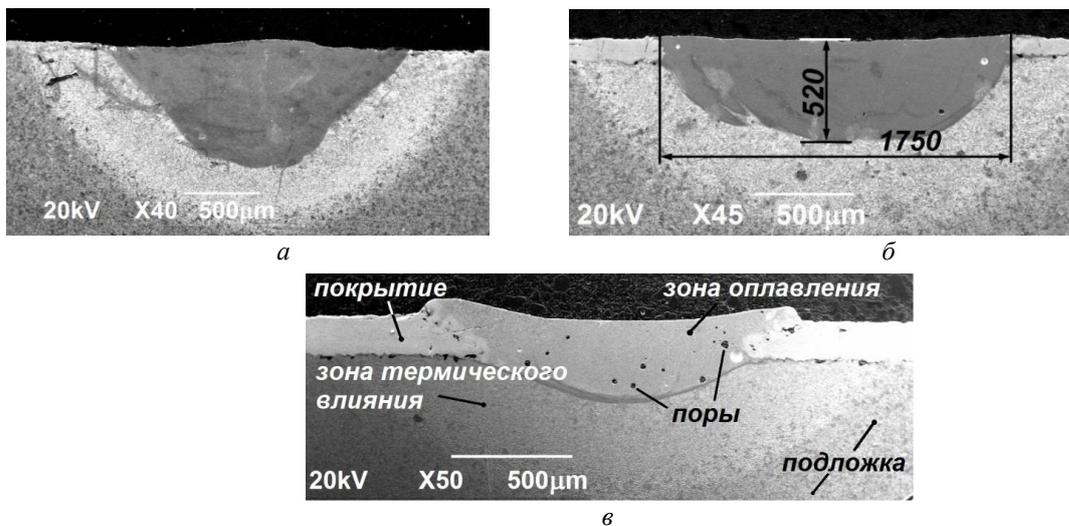


Рис. 1. Поперечный шлиф образца с покрытием после ЛО с мощностью 900 Вт и скоростью сканирования ЛИ, мм/с: а – 10; б – 20; в – 30

Результаты этих экспериментов были использованы для определения влияния многопроходной ЛО с перекрытием на пористость образовавшихся поверхностных структур. Выбор режима многопроходной ЛО проводился по критерию наибольшей глубины зоны оплавления и минимальных геометрических искажений поверхности зоны однопроходной ЛО. Для этой цели проводился визуальный контроль поперечного шлифа образцов на металлографическом микроскопе НЕОРНОТ-30.

Для многопроходной ЛО с перекрытием был выбран режим ЛО, для которого $P=900$ Вт, $V=20$ мм/с. В этом случае ширина дорожки ЛО $L=1,75$ мм, а глубина зоны оплавления материала – $0,52$ мм (рис. 1, б). Расстояние между центрами соседних дорожек (S) для многопроходной обработки с перекрытием было выбрано таким образом, что бы коэффициент перекрытия соседних дорожек (K_{II}), определяемый как отношение

$$K_{II} = \frac{S}{L},$$

не превышал $1,0$. Таким образом, были реализованы следующие значения смещения центров соседних дорожек: $S_1=1,0$ мм (рис. 2, а), $S_2=1,4$ мм (рис. 2, б), $S_3=1,7$ мм, для которых $K_{II}=0,57$; $0,80$ и $0,97$ соответственно.

Результаты экспериментов показали, что после многопроходной ЛО в покрытии при всех рассмотренных вариантах относительного смещения центров лазерных дорожек (S) при выбранном режиме ЛО образовалось большое количество пор (рис. 2). Наличие грубой морфологии покрытия, скорее всего, как и в [6], связано с попаданием окружающей атмосферы в повторно расплавленный материал покрытия во время лазерной постобработки и образованием внутри покрытия крупных газовых полостей (рис. 2).

Измерения пористости проводились на площади, включающей сечение анализируемой дорожки и зоны перекрытия соседних дорожек.

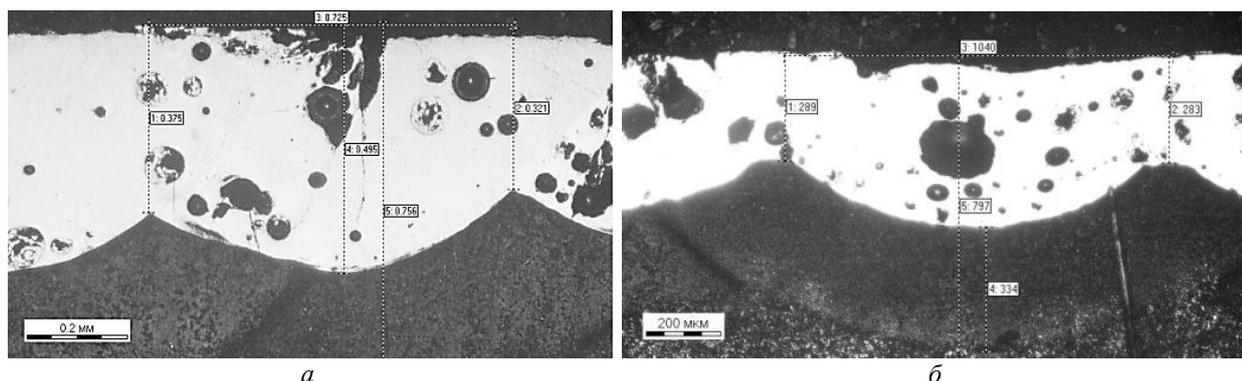


Рис. 2. Поперечный шлиф образца с покрытием после ЛО при различном смещении центров соседних лазерных дорожек: а – $S_1=1,0$ мм, $K_{II} = 0,57$; б – $S_2=1,4$ мм, $K_{II} = 0,8$

Процедура вычисления пористости заключается в следующем:

1. После загрузки снимка поперечного шлифа в ПО «JMicroVision», в пределах которого необходимо провести измерение пористости, выбирается модуль «Background Extraction» и открывается редактирование настроек на вкладке «Background Config» (рис. 3).

2. В окне «Selection» пользователем назначается цвет, на который будет заменен цвет пор (рис. 3).

3. В окнах «Intensity» и «Saturation» уста-

навливаются границы диапазона, определяющего заданный цвет пор, контролируемый визуально (рис. 3).

4. После завершения настроек и закрытия окна «Background Config» результаты расчета пористости на анализируемых снимках поперечного шлифа выводятся в диалоговом окне.

Предварительно на снимке поперечного шлифа цвет области, не относящейся к покрытию, был изменен, в нашем случае, на зеленый цвет (рис. 4), чтобы исключить ее из расчета степени порообразования.

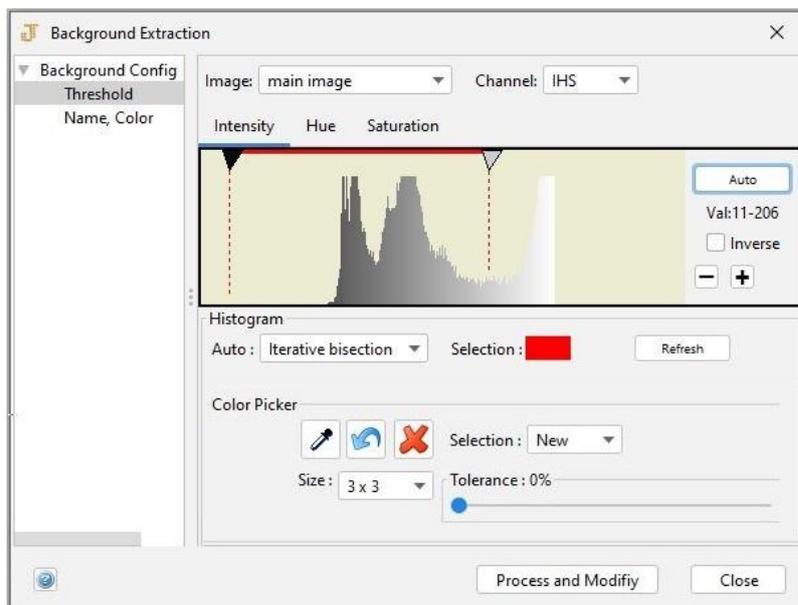


Рис. 3. Интерфейс модуля «Background Extraction» в программе «JMicroVision» для определения пористости покрытия

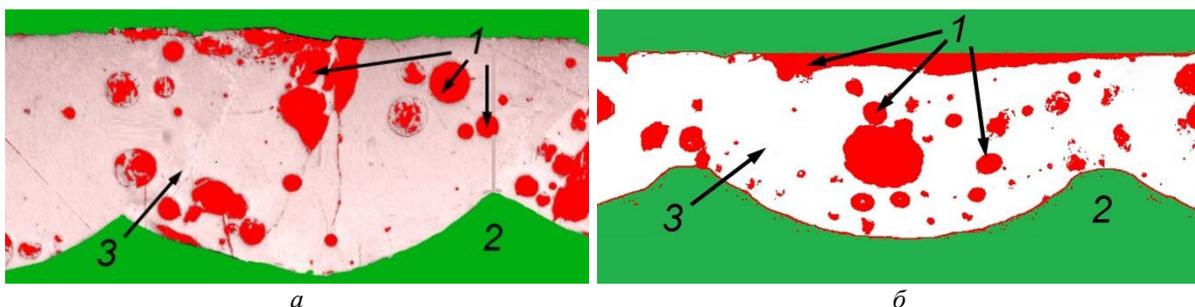


Рис. 4. Поперечный шлиф после цветокоррекции изображения пор:
 $a - S_1 = 1,0$ мм, пористость 10,7 %; $b - S_2 = 1,4$ мм, пористость 17,8 %;
 1 – поры; 2 – подложка; 3 – покрытие WC-10Co-4Cr

Для исследованного режима лазерной постобработки (900 Вт, 20 мм/с) получены следующие значения пористости при различных расстояниях между центрами соседних дорожек: 10,7 % при $S_1 = 1,0$ мм (рис. 4, *a*), 17,8 % при $S_2 = 1,4$ мм (рис. 4, *b*) и 20,9 % для $S_3 = 1,7$ мм.

Обязательным условием достоверности информации о пористости покрытий, полученных при различных режимах лазерной постобработки, является идентичность условий съемки, как по разрешению, так и по размеру изображения.

Выводы

В результате выполненных исследований и измерения пористости HVOF покрытий после многопроходной ЛО с оплавлением:

– установлена эффективность измерения пористости с помощью ПО «JMicroVision»;

– установлено существенное влияние мощности ЛИ и коэффициента перекрытия дорожек ЛО на пористость покрытий;

– показано, что для уменьшения пористости покрытий необходима оптимизация сочетания плотности мощности и скорости сканирования ЛИ для снижения перегрева поверхности при ЛО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Газотермическое напыление : учеб. пособие / Л. Х. Балдаев, В. Н. Борисов, В. А. Вахалин [и др.] ; под общ. ред. Л. Х. Балдаева. – М. : Маркет ДС, 2007. – 344 с.
2. Investigation on microstructure, surface properties and anti-wear performance of HVOF sprayed WC–CrC–Ni coatings modified by laser heat treatment / S.-H. Zhang, T.-Y. Cho, J.-H. Yoon et al. // Mater. Sci. Eng. B. – 2009. – V.162, № 2. – PP. 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.03.017>

3. Laser Remelting of WC-CoCr Surface Coated by HVOF: Effect on the Tribological Properties and Energy Efficiency / De Medeiros Castro R.; Curi E.; Feltrim Inacio L.F. et al. // Surf. Coat. Technol. – 2021. – 427(4). – 127841. DOI:10.1016/j.surfcoat.2021.127841

4. Ярьско, С. И. Лазерная модификация газотермических покрытий, получаемых методами высокоскоростного напыления (обзор) / С. И. Ярьско, И. А. Антошин // Стекло и керамика. – 2025. – Т.98, № 1. – С. 58–72. DOI: 10.14489/glc.2025.01.pp.058-072

5. Effect of Laser Remelting on the Microstructural and Mechanical Properties of High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF)-Sprayed WC-NiCr Coating / N.K. Singh, G. Vinay, H. Singh

et al. // J Therm Spray Tech. – 2024. – V.33. – PP. 1484-1495. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01785-5>

6. Improvement of thermally sprayed WC-Co/NiCr coatings by surface laser processing / A. Gisario, M. Puopolo, S. Venettacci S. et al. // Int. J Refract. Hard Met. – 2015. – V.52. – PP. 123-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.06.001>

7. Либенсон, Г. А. Производство порошковых изделий / Г. А. Либенсон. – М. : Металлургия, 1990. – 240 с.

8. Исследование пористости покрытий из кобальтовых и никелевых сплавов, наплавленных лазерным излучением / А. Г. Григорьянц, А. И. Мисюров, И. Н. Шиганов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 6. – С. 165–173.

Статья поступила в редакцию 15.11.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 15.11.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 66:081.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-64-68

Научная статья

Original article

А. Б. Голованчиков¹, П. П. Залипаев¹, О. А. Залипаева^{1,2}, С. Г. Поступаева¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА АБСОРБАТА В НАСЫЩЕННОМ АБСОРБЕНТЕ ПРИ КОНТРОЛЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

¹ Волгоградский государственный технический университет

² Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ, Волгоград, Россия

✉ Светлана Геннадиевна Поступаева, posvetlana@mail.ru

Аннотация. Предлагаются методики нахождения количества поглощенного абсорбата при определении равновесной зависимости процесса абсорбции. Приводятся результаты экспериментальных исследований при поглощении паров этилового спирта водой. Рассматривается применение оптимального метода нахождения массы абсорбата с учетом технологических и геометрических характеристик протекания процесса абсорбции.

Ключевые слова: абсорбат, процесс абсорбции, масса поглощенных паров, равновесная зависимость

Для цитирования: Голованчиков А. Б., Залипаев П. П., Залипаева О. А., Поступаева С. Г. Определение количества абсорбата в насыщенном абсорбенте при контроле параметров процесса. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 64–68. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-64-68

Информация об авторах:

Александр Борисович Голованчиков – профессор, д-р техн. наук, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-4576-4229

e-mail: a.b.golovanchikov@mail.ru

Павел Павлович Залипаев – аспирант, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ВолгГТУ

orcid.org/0009-0000-7736-752X

e-mail: zalipaevpavel@mail.ru

Ольга Александровна Залипаева – доцент, канд. техн. наук, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-9345-2625

e-mail: zalipaevaolga@yandex.ru

Светлана Геннадиевна Поступаева – старший преподаватель, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-3752-3062

e-mail: posvetlana@mail.ru

Вклад авторов:

А. Б. Голованчиков – методика проведения экспериментальных исследований.

П. П. Залипаев – проведение экспериментальных исследований и обработка экспериментальных данных.

О. А. Залипаева – обработка результатов, редактирование статьи.

С. Г. Поступаева – обработка результатов, редактирование статьи.

A. B. Golovanchikov¹, P. P. Zalipaev¹, O. A. Zalipaeva^{1,2}, S. G. Postupaeva¹

**DETERMINATION OF THE AMOUNT OF ABSORBATE
IN A SATURATED ABSORBENT WHEN CONTROLLING PROCESS PARAMETERS**

¹ Volgograd State Technical University (VSTU)

² Volzhsky Polytechnic Institute (branch) VSTU, Volgograd, Russia

✉ Svetlana G. Postupaeva, posvetlana@mail.ru

Abstract. Methods for determining the amount of absorbed absorbate when determining the equilibrium dependence of the absorption process are proposed. Results of experimental studies on the absorption of ethyl alcohol vapor by water are presented. The application of an optimal method for determining the mass of absorbate, taking into account the technological and geometric characteristics of the absorption process, is discussed.

Keywords: absorbate, absorption process, mass of absorbed vapor, equilibrium dependence

For citation: Golovanchikov A. B., Zalipaev P. P., Zalipaeva O. A., Postupaeva S. G. Determination of the amount of absorbate in a saturated absorbent when controlling process parameters. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 64–68. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-64-68

Information about the authors:

Alexander B. Golovanchikov – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Processes and apparatus of chemical and food production department, VSTU

orcid.org/0000-0002-4576-4229

e-mail: a.b.golovanchikov@mail.ru

Pavel P. Zalipaev – Postgraduate Student, Department of Processes and apparatus of chemical and food production department, VSTU

orcid.org/0009-0000-7736-752X

e-mail: zalipaevpavel@mail.ru

Olga A. Zalipaeva – Associate professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Processes and apparatus of chemical and food production department, VSTU

orcid.org/0000-0002-9345-2625

e-mail: zalipaevaolga@yandex.ru

Svetlana G. Postupaeva – Senior lecturer, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0002-3752-3062

e-mail: posvetlana@mail.ru

Contribution of the authors:

Alexander B. Golovanchikov – methodology for conducting experimental studies.

Pavel P. Zalipaev – conducting experimental studies and processing experimental data.

Olga A. Zalipaeva – processing results, editing the article.

Svetlana G. Postupaeva – processing results, editing the article.

Введение

При определении равновесной зависимости процесса абсорбции, как правило, используется эмпирический метод, в котором не всегда учитываются технологические и геометрические особенности протекания процесса [1–3]. Предлагается для уточненного технологического расчета абсорбционной насадочной колонны находить коэффициент Генри через массу поглощенных паров по кинетической кривой изменения их концентраций в очищенном инертном газе в периодическом процессе при насыщении абсорбента [4].

Материалы и методы исследования

Проведены экспериментальные исследования поглощения этилового спирта из воздуха водой при различных его концентрациях в исходной газовой смеси. На рис. 1 представлена зависимость изменения концентрации этилового спирта в воздухе в периодическом процессе до его равновесного значения при расходе газовой смеси 2,8 м³/ч.

Для нахождения массы поглощенных паров до точки равновесия объемную массовую концентрацию переводим в массовую долю, разделив полученные эмпирические значения на плотность воздуха (рис. 2) [5].

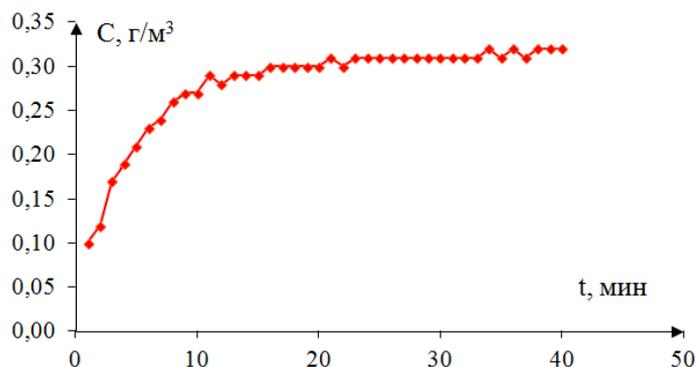


Рис. 1. Эмпирическая зависимость концентрации паров этилового спирта в очищаемом воздухе от времени при насыщении абсорбента

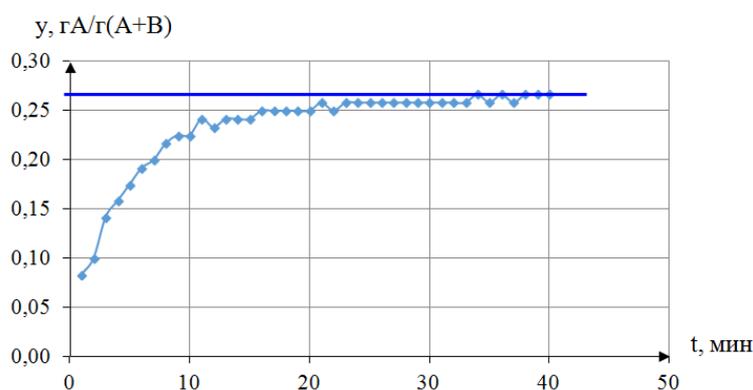


Рис. 2. Зависимость в массовых долях концентрации паров этилового спирта в очищаемом воздухе от времени при насыщении абсорбента

Для получения числового значения массы поглощенных паров вычисляем площадь криволинейного треугольника, ограниченного с нижней стороны кривой концентрации паров этилового спирта в воздухе, а с верхней точкой равновесия. Для нахождения площади под полученным графиком воспользуемся методом аддитивности трапеций, на которые разобьем полученную площадь. По результатам расчета

площадь под кинетической кривой принимает значения 9,191 мин·гА/г (А+В).

Результаты исследования и их обсуждение

Найденную площадь можно вычислить через функцию линии тренда, описав ее логарифмической зависимостью, которую затем проинтегрируем по времени проведения эксперимента (рис. 3).

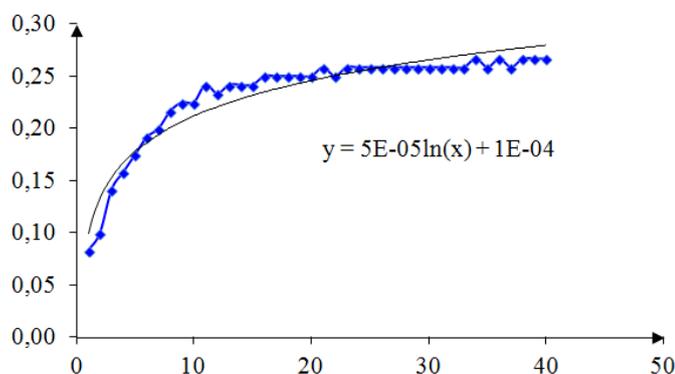


Рис. 3. Зависимость в массовых долях концентрации паров этилового спирта в очищаемом воздухе, аппроксимированная логарифмическим уравнением

Аппроксимация полученной зависимости массовой доли от времени позволяет теоретически рассчитать площадь под кривой, которая принимает значение $9,377 \text{ мин} \cdot \text{гА/г (А+В)}$, что более чем на 2 % превышает значение площа-

ди, полученной при геометрическом разбиении ее на трапеции.

Более точные результаты при теоретическом расчете дает аппроксимация полученной зависимости полиномиальным уравнением (рис. 4).

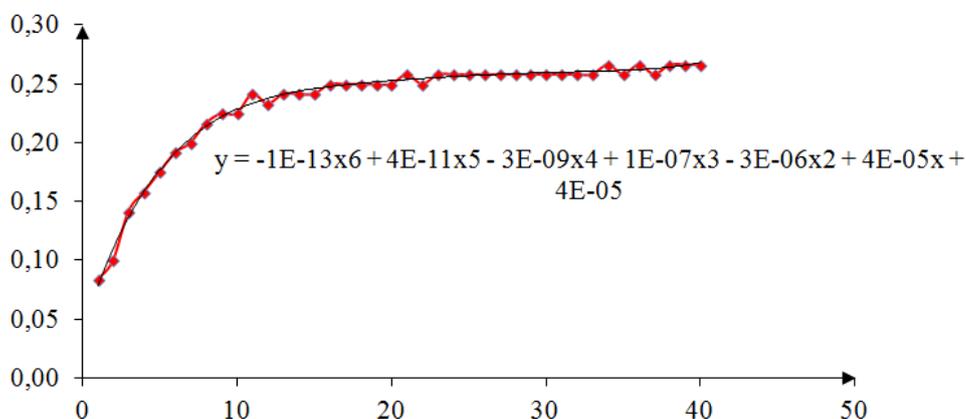


Рис. 4. Зависимость в массовых долях концентрации паров этилового спирта в очищаемом воздухе, аппроксимированная полиномиальным уравнением

По результатам расчета площадь под кинетической кривой принимает значения $9,281 \text{ мин} \cdot \text{гА/г (А+В)}$, при этом погрешность вычисления по сравнению с методом аддитивности трапеций не превышает 1 %.

По полученным значениям найдем площадь над эмпирической кривой как разность площади прямоугольника, ограниченного равновесной точкой и полученной площадью криволинейной трапеции. Для геометрического метода эта площадь составляет $1,208 \text{ мин} \cdot \text{гА/г (А+В)}$, а при аппроксимации уравнением с натуральным логарифмом – $1,023 \text{ мин} \cdot \text{гА/г (А+В)}$, что более чем на 15 % отличается от более точного геометрического метода и делает эту аппроксимацию нежелательной.

Для вычисления массы поглощенного абсорбата при определении равновесной зависимости процесса абсорбции домножим полученную площадь на расход газовой смеси, выраженную в г/мин

$$m = q \cdot 1,208 = (2,8 \cdot 1,2 \cdot 1000/60) \cdot 1,208 = 67,8 \text{ г.}$$

Полученное значение согласуется с проверочным экспериментальным взвешиваем абсорбента до проведения процесса насыщения и после него

$$1300 - 1217 = 83 \text{ г.}$$

Незначительное превышение изменения объема абсорбента после его насыщения от полученных теоретических значений по площади

над экспериментальной кривой объясняется попаданием паров воды из смеси, через которую проходит воздух при насыщении парами этилового спирта на входе в абсорбционную колонну.

Выводы

Таким образом, для нахождения равновесной зависимости при проведении процесса абсорбции массу поглощенных паров можно теоретически рассчитать по кинетической кривой концентрации этих паров в очищенном газе. Для аппроксимации кинетической кривой рекомендуется использовать полиномиальное уравнение высокого порядка, которое дает более точные значения в сравнении с аппроксимацией логарифмическим уравнением. По полученным значениям строится равновесная зависимость процесса абсорбции, применяемая в технологических расчетах абсорбционных колонн.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет и проектирование массообменных аппаратов : учеб. пособие / под. ред. А. Н. Острикова. – СПб. : Лань, 2015. – 352 с.
2. Sander Rolf. Compilation of Henry's law constants for inorganic and organic species of potential importance in environmental chemistry. 8 Apr. 1999,
3. Zhil'tsova O. A., Trusov S. A., Tyabin N. V. Determination of disperse-phase parameters for bubbling // Theoretical foundations of chemical engineering. – 1998. – Т. 32. – №. 1. – С. 82-84.
4. Определение коэффициента Генри в автоматизиро-

ванной установке по массе поглощенных паров / А. Б. Голованчиков, П. П. Залипаев, О. А. Залипаева, С. Г. Поступаева // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (296) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2025. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 66–69.

5. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для студ. вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под. ред. П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 576 с.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025
The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 681.142
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-68-71

Научная статья
Original article

Н. Г. Дудкина, И. В. Приходькова, А. Р. Брунилина

**ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММ
В ПРЕПОДАВАНИИ ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН
НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГАЙКОВЫРУБНОГО АВТОМАТА**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Наталья Геннадьевна Дудкина, dtm@vstu.ru

Аннотация. Предлагается программа для автоматизированного расчета кинематических и динамических характеристик плоского механизма. Рассматривается возможность применения учебных модулей автоматизированных расчетов в научно-исследовательской работе учащихся инженерных специальностей. Описаны структура разработанной программы и алгоритм действий студентов при решении прикладных задач дисциплин «Теория механизмов и машин» и «Техническая механика».

Ключевые слова: цифровые технологии, программа автоматизированного расчета, учебный модуль, курсовое проектирование, научно-исследовательская работа

Для цитирования: Дудкина Н. Г., Приходькова И. В., Брунилина А. Р. Применение автоматизированных программ в преподавании теории механизмов и машин на примере расчета параметров гайковырубного автомата. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 68–71. DOI:10.35211/1990-5297-2026-1-308-68-71

Информация об авторах:

Наталья Геннадьевна Дудкина – доцент, канд. техн. наук, кафедра «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-1502-7025

e-mail: dtm@vstu.ru

Инна Владимировна Приходькова – старший преподаватель, кафедра «Вычислительная техника», ВолгГТУ

e-mail: prikiv@yandex.ru

Анастасия Романовна Брунилина – студент, ФАСТиВ, ВолгГТУ

e-mail: brunilina.anastasya@mail.ru

Вклад авторов:

Н. Г. Дудкина – разработка концепции статьи, учебного модуля автоматизированного расчета.

И. В. Приходькова – написание исходного текста, программная реализация алгоритма.

А. Р. Брунилина – разработка алгоритма программы, проверка результатов автоматизированного расчета.

N. G. Dudkina, I. V. Prikhodkova, A. R. Brunilina

**THE USE OF AUTOMATED PROGRAMS IN TEACHING THE THEORY
OF MECHANISMS AND MACHINES USING THE EXAMPLE
OF CALCULATING THE PARAMETERS NUT CUTTING MACHINE**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Natalia G. Dudkina, dtm@vstu.ru

Abstract. A program for the automated calculation of the kinematic and dynamic characteristics of a flat mechanism is proposed. The potential for using automated calculation training modules in the research work of engineering students is explored. The structure of the developed program and the algorithm for student actions in solving applied problems in the disciplines "Theory of Mechanisms and Machines" and "Engineering Mechanics" are described.

Keywords: digital technologies, automated calculation program, training modul, course design, research work

For citation: Dudkina N. G., Prikhodkova I. V., Brunilina A. R. The use of automated programs in teaching the theory of mechanisms and machines using the example of calculating the parameters nut cutting machine. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 68–71. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-68-71

Information about the authors:

Natalia G. Dudkina – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Machine Dynamics and Strength, VSTU

orcid.org/0000-0002-1502-7025

e-mail: dtm@vstu.ru

Inna V. Prikhodkova – Senior Lecturer, Department of Computer Engineering, VSTU

e-mail: prikiv@yandex.ru

Anastasia R. Brunilina – Student, FASW, VSTU

e-mail: brunilina.anastasya@mail.ru

Contribution of the authors:

Natalia G. Dudkina – developing the concept of the article, development of a training module for automated calculations.

Inna V. Prikhodkova – writing the source code, software implementation of the algorithm.

Anastasia R. Brunilina – development of a program algorithm, verification of automated calculation results.

Введение

В последнее время в образовательный процесс активно внедряются цифровые технологии. Известно, что новые учебные планы рекомендуют внедрять в традиционную форму обучения цифровые технологии, что обусловлено указанными в рабочих программах компетенциями. Навыки работы с информационными технологиями становятся неотъемлемой частью учебного процесса и инновационного подхода к управлению научно-исследовательской деятельностью обучающихся [1, 2]. Предлагается применение учебных цифровых модулей для получения знаний и навыков успешной исследовательской деятельности студентов на ранних курсах обучения. Выполняя научно-исследовательские задания, студенты осваивают аналитические, постановочные, поисковые и синтезирующие элементы научной работы в результате чего у них развиваются общие и специальные научные навыки проведения исследования и обобщение его результатов.

На протяжении ряда лет авторы активно участвуют в цифровой трансформации образовательного процесса вуза: 1) использование информационных технологий при чтении лекций по курсам «Теория механизмов и машин» и «Современные проблемы науки техники и технологии» [3, 4]; создание электронного научно-информационного программного комплекса «Комбинированная технология поверхностного упрочнения деталей ЭМО+ППД», отражающего область научных интересов авторов и служащего для систематизации исследовательских и прикладных научных разработок сотрудников вуза по данному направлению; 3) программа для ЭВМ «Кинематический и динамический анализ механизмов двигателя внутреннего сгорания» [5] и др.

Целью данной работы является создание программы автоматизированного расчета «Учебный модуль для расчета и анализа кинематических и динамических характеристик гайковырубного автомата» для использования в учебном процессе при выполнении курсовых проектов (работ) по дисциплине «Теория механизмов и машин» и получение навыков компьютеризированных научных исследований на ранних этапах обучения.

Материалы и методы исследования

Расчетная схема изучаемого механизма гайковырубного автомата представлена на рис. 1.

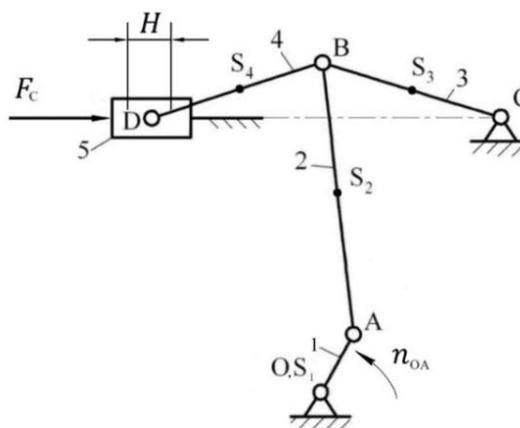


Рис. 1. Кинематическая схема механизма гайковырубного автомата:

1 – кривошип OA; 2 – шатун AB; 3 – коромысло BC;
4 – шатун BD; 5 – ползун с пазом D

В рамках учебного модуля были создана программа, написанная на языке программирования высокого уровня C++ [6]. Исследование динамических и энергетических характеристик механизма проводилось по методу Ф. Виттенбауэра [4].

Результаты исследования и их обсуждение

В программе «Учебный модуль для расчета и анализа кинематических и динамических характеристик гайковырубного автомата» предусмотрен автоматизированный расчет перемещений, скоростей (линейных и угловых); приведенных моментов от внешних сил, приведенных моментов инерции и кинетической энергии от угла поворота начального звена механизма; графическое построение функций, на основе которых анализируется изменение угловой скорости начального звена механизма. Качественное отличие разработанной программы для курсовых проектов (работ) заключается в изменении метода их решения: замена векторных трудоемких построений на аналитический расчет с последующим построением графических зависимостей.

Текст программ скомпилирован в исполняемый файл, который позволяет в диалоговом

режиме работать с пользователем, а также загружает справочную информацию из специального файла. Функциями программы является автоматическое выполнение расчетов по заданным массогабаритным и режимным параметрам величины скоростей, моментов от внешних сил, моментов инерции, кинетической энергии, сохранение результатов работы в файл, с последующей возможностью анализа и изменения данных, вывод на печать таблиц и графиков рассматриваемых параметров (рис. 2). Согласно справочной информации, заложенной в программе, студенты вводят исходные данные механизма гайковырубного автомата (частоту вращения кривошипа, размеры звеньев, массы звеньев, силу полезного сопротивления), проводят автоматизированный расчет на основе заложенных в программу алгоритмов и получают конечный результат. На основе полученных расчетов, следуя указаниям справочной информации, учащиеся строят диаграмму энергомасс.

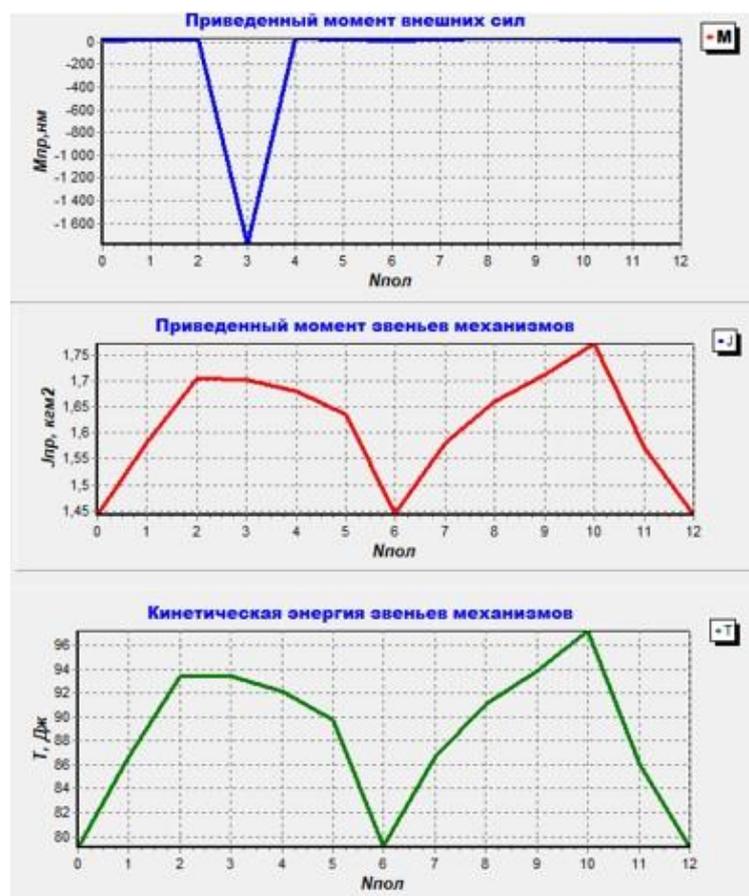


Рис. 2. Графики приведенных моментов от внешних сил $M_{пр}$; приведенных моментов инерции $J_{пр}$; кинетической энергии T , выполненные на основе программы автоматизированного расчета

Созданный контент распечатывается и приводится в расчетно-пояснительной записки

курсового проекта (работы). Автоматическая система расчетов позволяет студентам: сокра-

тить затраченное время при курсовом проектировании; гарантирует высокую точность и надежность расчетов; позволяет анализировать полученные данные и своевременно выявлять проблемы и ошибки.

В статье предлагается применение учебного цифрового модуля для получения знаний и навыков самостоятельной исследовательской деятельности студентов на ранних курсах обучения: сбор и анализ необходимой информации, ее обработка, выбор оптимальных путей решения, анализ полученных результатов и т. д. Цифровая технология, применяемая при курсовом проектировании, предлагает студентам не ограничиваться стандартными расчетами, а проводить исследование характеристик движения и анализ массогабаритных параметров нескольких вариантов исследуемого механизма с целью выявления наилучшего по выбранным критериям (например, скорости ведомого звена, коэффициента неравномерности движения механизма). Применение предлагаемой программы позволяет решать задачи оптимизации параметров механизмов, получать числовые значения параметров с требуемой точностью, а также дает возможность применить принцип *альтернативности* в рамках стандартного курсового проектирования – выбор альтернативного варианта из системы отображенных для анализа критериям.

Возможность реализации принципа альтернативности в рамках традиционной формы курсового проектирования является фактором развития творческой активности студентов. Сравнение и оценивание между собой полученных данных; сравнение различных методов решения поставленной задачи (графический, графо-аналитический, аналитический); выбор оптимального решения приводит к формированию исследовательских компетенций у студентов инженерно-технических специальностей, творческого мышления и критического осмысления, и как следствие, проведение успешной научной деятельности на старших курсах обучения при

выполнении выпускных работ студентов инженерно-технических специальностей.

Выводы

Таким образом, созданная программа «Учебный модуль для расчета и анализа кинематических и динамических характеристик гайковорубного автомата» позволяет на основе массового автоматизированного расчета улучшить точность аналитики; способствует развитию цифровых навыков и повышению цифровой грамотности в процессе обучения. Представленная образовательная технология позволяет формировать необходимые исследовательские компетенции на ранних курсах обучения студентов машиностроительных специальностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловов, А. В. Электронное обучение: вектор развития / А. В. Соловов, А. А. Меньшикова // Высшее образование в России. – 2015. – № 11. – С. 66–75.
2. Лекомцева, Е. Н. Научно-исследовательские компетенции бакалавра / Е. Н. Лекомцева // Ярославский педагогический вестник. – 2009. – № 3. – С. 92–96. <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33599841>.
3. Дудкина, Н. Г. Внедрение интенсивно-информационных технологий обучения в лекционный курс «Теория механизмов и машин» / Н. Г. Дудкина // Теория механизмов и машин. – 2013. – Т. 11. – № 1 (21). – С. 84–89. <https://elibrary.ru/item.asp?id=18951754>
4. Дудкина, Н. Г. Разработка мультимедийных лекций для магистрантов по курсу «Современные проблемы науки, техники и технологии» / Н. Г. Дудкина // Известия ВолгГТУ : № 11 (98) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Новые образовательные системы и технологии обучения в вузе» ; т. 9). – С. 50–52. <https://elibrary.ru/item.asp?id=18047754>
5. Дудкина, Н. Г. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU № 2015615992 28.05.2015. Кинематический и динамический анализ механизмов двигателя внутреннего сгорания / Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров, И. В. Приходькова, К. В. Приходьков ; ВолгГТУ. – 2015. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39332222>.
6. Дудкина, Н. Г. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU № 2024683045, 04.10.2024. Учебный модуль для курсовых и контрольных работ по дисциплине ТММ «Кинематический и динамический анализ гайковорубного автомата» / Н. Г. Дудкина, И. В. Приходькова, А. Р. Брунилина ; ВолгГТУ. – 2024. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73234724>

Статья поступила в редакцию 01.11.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 01.11.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 621.9-11
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-72-75

Научная статья
Original article

Д. В. Кимбор, А. В. Дроботов

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ГИБРИДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСТАНОВОК: СОВМЕЩЕНИЕ 3D-ПЕЧАТИ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Алексей Владимирович Дроботов, a_drobotov@vstu.ru

Аннотация. Рассмотрены текущее состояние и перспективы гибридных производственных систем, объединяющих функции 3D-печати и фрезерования. Проанализированы инженерные противоречия при совмещении аддитивных и субтрактивных технологий. Проведен сравнительный анализ модульной системы Snapmaker и 3D-принтера ZENIT HT, выделены достоинства и недостатки различных конструкторских подходов. Отмечены перспективы концепции послойного фрезерования для получения высокой точности поверхностей изделий со сложной геометрией.

Ключевые слова: аддитивное производство, субтрактивные технологии, гибридные станки, ЧПУ-фрезерование, Snapmaker, ZENIT HT

Для цитирования: Кимбор Д. В., Дроботов А. В. Анализ современных гибридных производственных установок: совмещение 3D-печати и фрезерования. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 72–75. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-72-75

Информация об авторах:

Даниил Васильевич Кимбор – аспирант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ
e-mail: daniil2001v@gmail.com

Алексей Владимирович Дроботов – доцент, канд. техн. наук, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0003-1148-0495

e-mail: a_drobotov@vstu.ru

Вклад авторов:

Д. В. Кимбор – обзор текущего состояния, перспектив и противоречий гибридных систем 3D-печати и фрезерования, составление текста.

А. Д. Дроботов – определение цели работы, участие в обсуждении результатов, корректировка текста статьи.

D. V. Kimbor, A. V. Drobotov

ANALYSIS OF MODERN HYBRID PRODUCTION FACILITIES: COMBINING 3D PRINTING AND MILLING

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Alexey V. Drobotov, a_drobotov@vstu.ru

Abstract. The current state and prospects of hybrid production systems combining the functions of 3D printing and milling are considered. The engineering contradictions in the combination of additive and subtractive technologies are analyzed. A comparative analysis of the Snapmaker modular system and the ZENIT HT 3D printer is carried out, the advantages and drawbacks of various design approaches are highlighted. Prospects of the hybrid layer manufacturing concept are determined for producing high-precision surfaces of products with complex geometry.

Keywords: additive manufacturing, subtractive technologies, hybrid machines, CNC milling, Snapmaker, ZENIT HT

For citation: Kimbor D. V., Drobotov A. V. Analysis of modern hybrid production facilities: combining 3D printing and milling. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 72–75. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-72-75

Information about the authors:

Daniil V. Kimbor – graduate student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU
e-mail: daniil2001v@gmail.com

Alexey V. Drobotov – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0003-1148-0495

e-mail: a_drobotov@vstu.ru

Contribution of the authors:

Daniil V. Kimbor – review of the current state, prospects, and contradictions of hybrid 3D printing and milling systems, and writing the text.

Alexey V. Drobotov – determined the purpose of the work, participated in the discussion of the results, article text correction.

Введение

В современном мелкосерийном производстве, образовательной сфере и частном сегменте все чаще возникает потребность в универсализации оборудования. Ограниченные площади мастерских и экономические факторы стимулируют спрос на устройства, способные выполнять как аддитивные операции послойного наращивания, так и субтрактивные методы удаления материала. Целью данной работы является выявление наиболее перспективных конструкторско-технологических решений в данной области для их дальнейшего развития.

3D-принтеры с возможностью фрезерования находят широкое применение в изготовлении функциональных прототипов, архитектурном макетировании и образовательных процессах, позволяя на одной базе изучать принципы работы с G-кодами разного типа.

Анализ требований к аддитивным и фрезерным устройствам

Для понимания принципов построения гибких устройств важно учесть фундаментальные различия в требованиях к процессам. Фрезерование требует высокой жесткости станины, массивного шпинделя с большим крутящим моментом и точного поддержания оборотов под нагрузкой из-за значительных сил резания и вибраций [3]. Аддитивные системы, напротив, ориентированы на инерционные характеристики: критически важны высокие скорости перемещения и ускорения для быстрой укладки тысяч слоев, что требует минимального веса подвижной части [1]. Здесь возникает главное инженерное противоречие: необходимо снижать вес подвижной части для печати, но увеличивать его для фрезерования. Известен ряд систем, пытающихся решить этот компромисс, и их классифицируют по способу реализации кинематики (портальные декартовы схемы, дельта-роботы, SCARA-роботы), типу корпуса (открытый профиль, закрытый короб) и методу смены инструмента (ручная модульная, автоматическая АТС) [2].

Существующие аддитивно-фрезерные производственные установки

Рассматривая конкретные реализации, можно выделить популярную экосистему Snap-

maker и российскую разработку ZENIT HT. Snapmaker 2.0 (рис. 1) представляет собой модульную конструкцию из алюминиевого профиля [9]. Это обеспечивает лучшую точность позиционирования инструмента для фрезерования, но существенно ограничивает динамику и скорость аддитивного процесса из-за инерционных ограничений шарико-винтовых пар [6].

Смена модулей между 3D-печатью, лазером и фрезером происходит быстро благодаря специализированным разъемам. К минусам Snapmaker можно отнести открытую конструкцию, которая не защищает от шума и пыли, а также использование винтовых передач, ограничивающих скорость печати.

Российский принтер ZENIT HT 3-in-1 (рис. 2), оснащенный возможностью установки фрезерной головки, базируется на жестком стальном закрытом корпусе, что помогает гашению вибраций при фрезеровании и удержания пыли внутри камеры. Печатающая головка 3D-принтера ZENIT рассчитана на профессиональную печать высокотемпературными пластиками, что делает его надежным инструментом для инженерных задач [10].

Однако при детальном анализе операционных циклов принтера ZENIT (и аналогичных систем со сменными головками) выявляется критическое ограничение. Процедура перехода от аддитивного режима к субтрактивному сопряжена с необходимостью физического демонтажа экструдера и установки шпиндельного узла. Данный процесс характеризуется значительными затратами времени, включающими механическую переналадку, электрическую коммутацию и необходимость повторной калибровки системы координат и определения вылета инструмента (Z-офсета) [4]. Существенная длительность цикла смены инструмента делает абсолютно невозможной реализацию стратегии послойного фрезерования (inter-layer milling), при которой механическая обработка контура должна производиться после каждого нанесенного слоя или их группы. Охлаждение камеры при открытии дверцы для смены инструмента также негативно сказывается на адгезии слоев.

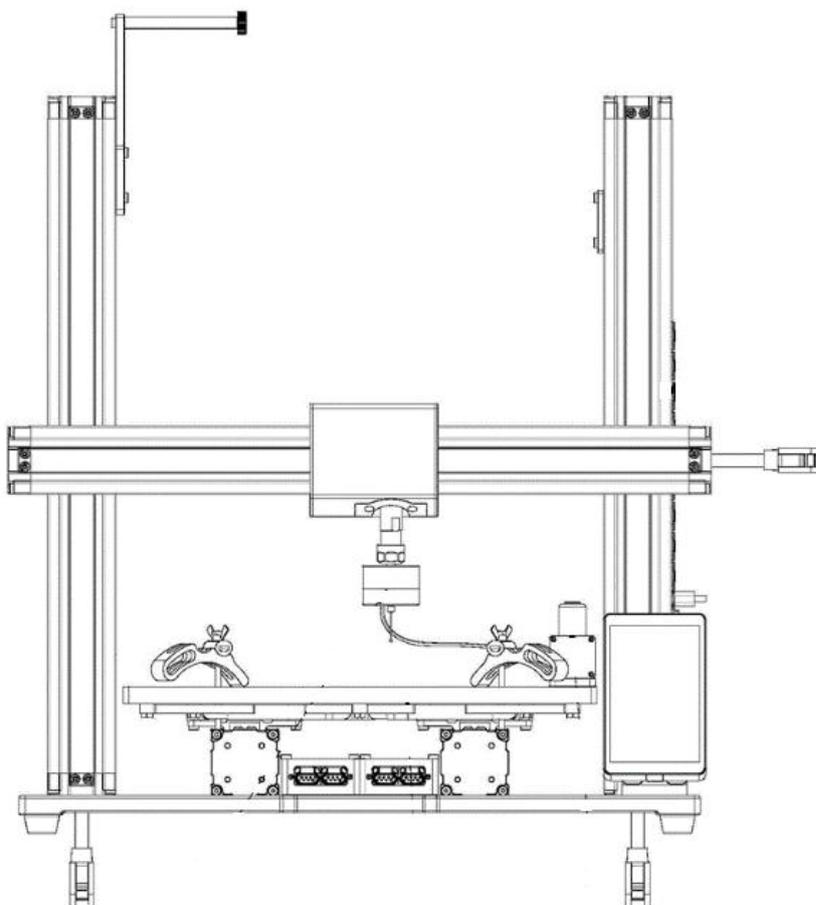


Рис. 1. Схема 3D-принтера Snapmaker 2.0 A350

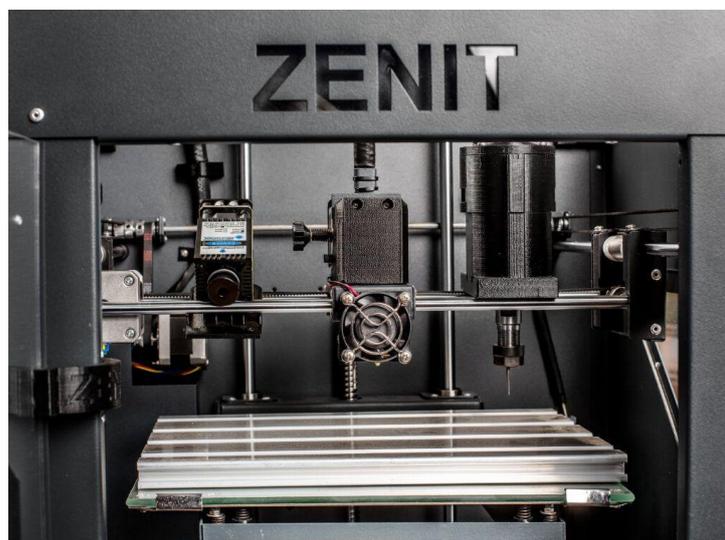


Рис. 2. 3D-принтер ZENIT HT 3-in-1

Следовательно, для реализации истинного гибридного цикла, позволяющего обрабатывать внутренние полости и сложные поверхности непосредственно в процессе выращивания, необходим отказ от концепции сменных модулей. Тех-

нически обоснованным решением является переход к интегральной компоновке, предусматривающей стационарное параллельное размещение экструзионной головки и высокоскоростного шпинделя на единой усиленной каретке портала.

Это позволит переключаться между режимами «печать» и «фрезерование» программно, в рамках выполнения единого G-кода, сводя вспомогательное время к секундам и сохраняя единую систему координат на протяжении всего цикла изготовления [8].

Перспективы развития

Перспективы развития гибридных аддитивно-фрезерных установок выходят далеко за рамки простого объединения двух функций. В ближайшем будущем ожидается переход от стандартных трехосевых систем к пятиосевой обработке. Это позволит печатать детали сложной геометрии без поддерживающих структур, наклоня изделие в процессе печати, а затем, не снимая деталь с платформы, проводить чистовую фрезерную обработку функциональных поверхностей, достигая промышленных допусков точности, недоступных для обычной FDM-технологии. Также важным вектором развития станет внедрение интеллектуальных систем контроля на базе искусственного интеллекта: станки будут оснащаться камерами и датчиками вибраций для мониторинга процесса в реальном времени, автоматически корректируя режимы резания или печати при обнаружении дефектов. Также перспективным направлением является разработка специализированных материалов, оптимизированных для гибридной обработки – пластиков и композитов, которыми легко печатать, но при этом обеспечивающих качественную поверхность при фрезеровании, не оплавливаясь на фрезе. Наконец, ожидается более глубокая интеграция программного обеспечения, где нейросети будут самостоятельно определять, какую часть изделия выгоднее напечатать макроструктурой, а какую – доработать фрезой для получения идеальной шероховатости, полностью автоматизируя цикл «от модели до готовой детали».

Перспективы развития гибридных систем связаны с переходом к качественно новым алгоритмам работы, среди которых наиболее многообещающей является технология послойного фрезерования (Hybrid Layer Manufacturing). Концепция предполагает наличие стационарно установленных (или автоматически сменяемых) экструдера и шпинделя на одном портале. В отличие от традиционного пост-процессинга, где деталь обрабатывается только после

полного завершения печати и фреза не может добраться внутрь готовой детали, новая технология подразумевает механическую обработку контура после нанесения каждого отдельного слоя или группы слоев [7]. Принтер создает слой с припуском, после чего фреза снимает излишки, обеспечивая точность до 9 качества и шероховатость Rz менее 30. Это позволяет изготавливать детали со сложными внутренними каналами, недостижимыми при стандартной FDM-печати. Такая технология открывает путь к созданию высокоэффективных теплообменников, гидравлических компонентов и волноводов. Вкупе с внедрением 5-осевой кинематики и систем ИИ-коррекции вибраций, это превратит гибридные установки в автономные микрофабрики, способные производить готовые функциональные узлы без необходимости ручной постобработки [5]. В перспективе это продвинет гибридные установки из инструментов для хобби в полноценные микрофабрики для создания конечных изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – Москва : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
2. Валявин, Г. Г. Интеграция аддитивных и субтрактивных технологий в современном производстве / Г. Г. Валявин, А. С. Петров // Вестник машиностроения. – 2019. – № 4. – С. 45–51.
3. Григорьев, С. Н. Гибридные технологии производства : учеб. пособие / С. Н. Григорьев, А. А. Кутин, М. П. Козочкин. – Старый Оскол : ТНТ, 2021. – 344 с.
4. Слюсар, В. И. Фабрика в каждом доме: технологии 3D-печати / В. И. Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2014. – № 8. – С. 96–101.
5. ГОСТ Р 57558–2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. – Введ. 2017-12-01. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 18 с.
6. Фоглер, М. Проектирование и эксплуатация гибридных обрабатывающих центров / М. Фоглер, Д. Шмидт. – Санкт-Петербург : Политехника, 2018. – 210 с.
7. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – New York : Springer, 2015. – 498 p.
8. Grzesik, W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review // Journal of Machine Engineering. – 2018. – Vol. 18. – No. 4. – Pp. 5–24.
9. Snapmaker 2.0 – User Manual // Your Ultimate Manuals Destination: [сайт]. URL: <https://www.easymenua.ls/snapmaker/2-0/manual>.
10. ООО «Зенит 3Д». 3D принтер ZENIT. Руководство по эксплуатации. – Раменское : Зенит 3Д, 2021. – 42 с.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 004.93'1
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-76-81

Научная статья
Original article

Д. С. Князев, А. М. Макаров

**АНАЛИЗ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ГЛУБИНЫ НА БАЗЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ
ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ КОЛЕСНОГО РОБОТА В ПРОСТРАНСТВЕ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Дмитрий Сергеевич Князев, dimagold.dg53@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты анализа методов построения карт глубины. Рассмотрены методы построения карты глубины на основе данных LiDAR и на основе сверточной нейронной сети. Проведена серия опытов на выборке изображений и карт глубин NYUv2, а также оценка точности построения карт с помощью различных метрик. Определена зависимость погрешности карты от максимальной глубины в кадре. Результаты исследования показали аналогичную величину погрешности в оценке глубины кадра для нейросети по сравнению сLiDAR.

Ключевые слова: нейронная сеть, LiDAR, карта глубины, метрика, погрешность, колесный робот, компьютерное зрение

Для цитирования: Князев Д. С., Макаров А. М. Анализ метода построения карт глубины на базе нейронной сети для ориентации колесного робота в пространстве. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 76–81. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-76-81

Информация об авторах:

Дмитрий Сергеевич Князев – магистрант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

orcid.org/0009-0004-5116-8409

e-mail: dimagold.dg53@gmail.com

Алексей Михайлович Макаров – зав. кафедрой, канд. техн. наук, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0001-5617-8738

e-mail: ammm34@mail.ru

Вклад авторов:

Д. С. Князев – проведение эксперимента, анализ результатов эксперимента, написание текста статьи.

А. М. Макаров – постановка задачи и цели исследования, планирование эксперимента и обсуждение результатов

D. S. Knyazev, A. M. Makarov

**ANALYSIS OF THE METHOD OF CONSTRUCTING DEPTH MAPS BASED ON A NEURAL
NETWORK FOR THE ORIENTATION OF A WHEELED ROBOT IN SPACE**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Dmitriy S. Knyazev, dimagold.dg53@gmail.com

Abstract. The article presents the results of an analysis of methods for constructing depth maps. The following methods are considered: building a depth map based on lidar data, based on a convolutional neural network. A series of experiments was conducted on a sample of NYUv2 images and depth maps. The accuracy of mapping using various metrics has been assessed. The dependence of the error size on the maximum depth in the frame is determined. The results showed an error in estimating the frame depth for the neural network similar to lidar.

Keywords: neural network, LiDAR, depth map, metric, error, wheeled robot, computer vision

For citation: Knyazev D. S., Makarov A. M. Analysis of the method of constructing depth maps based on a neural network for the orientation of a wheeled robot in space. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 76–81. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-76-81

Information about the authors:

Dmitriy S. Knyazev – Master's student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0009-0004-5116-8409

e-mail: dimagold.dg53@gmail.com

Alexey M. Makarov – Head of the Department, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0001-5617-8738

e-mail: ammm34@mail.ru

Contribution of the authors:

Dmitriy S. Knyazev – conducting an experiment, analyzing the results of the experiment, writing the text of the article.

Alexey M. Makarov – setting the task and objectives of the study, planning the experiment and discussing the results.

Введение

Современная робототехника переживает этап активного внедрения в различные сферы человеческой деятельности, где ключевым требованием является высокая степень автономности. Для колесных мобильных роботов, являющихся одним из наиболее распространенных типов платформ, фундаментальной задачей остается точная и надежная ориентация в статическом или динамически изменяющемся пространстве [1, 2]. В этом контексте особую актуальность приобретает построение карт глубины, которые представляют собой плотные представления сцены, где каждому пикселю изображения соответствует расстояние от сенсора до объекта в реальном мире. Такие карты являются достаточно информативным источником, позволяющий роботу не только детектировать препятствия, но и понимать топологию пространства.

Технологии оценки глубины находят применение в различных областях. В логистике алгоритм может применяться для навигации в стеллажных лабиринтах, обхода персонала и погрузочной техники. В сельском хозяйстве – автономное движение по полям с учетом неровного рельефа, объезд препятствий [2].

Традиционные методы навигации, основанные на данных с одометрии и двумерных LiDAR, зачастую сильно зависят от выбранного оборудования и его калибровки под определенную среду, использования дополнительных алгоритмов для подавления шумов. В последнее время стало популярно использовать при решении этих задач модели глубокого обучения. Нейронные сети, обученные на больших наборах данных, демонстрируют способность восстанавливать глубину сцены даже из одного RGB-изображения, эффективно справляясь с проблемами текстур и окклюзий, при существенно меньших затратах в комплекующих для роботизированных систем [3].

Таким образом, целью данного исследования было проанализировать метод построения карт глубины на основе нейронной сети для последующего использования в системе ориентации колесного робота в пространстве.

Материалы и методы исследования

Колесный робот является системой реального времени. Одной из особенностей такой системы является скорость предоставления данных. Поэтому были выбраны следующие метрики для оценки качества построения карты глубины:

1. Скорость получения результатов.
2. Точность (абсолютная и относительная) построения карты.
3. Объем ресурсов, необходимых для вычислений.

В качестве эталонных показателей был рассмотрен ряд из 15 экземпляров построенных карт глубины с помощью LiDAR из датасета NYUv2 [4]. Данный метод оценки необходим для сравнений результатов построения карт в равных условиях.

В качестве модели глубокого обучения была выбрана модель Depth Pro [5]. Это нейросетевая модель с открытым исходным кодом, предназначенная для построения высокоточных карт глубины из одного единственного RGB-изображения. В отличие от систем, использующих LiDAR или стереокамеры, эта модель не требует специального оборудования и может работать на любом устройстве, где есть камера, что значительно расширяет ее потенциальную область применения. Модель основана на архитектуре MiDaS (Multi-scale Deep Networks for monocular depth estimation), но с кардинальным улучшением. А. Бочковский, А. Делонуа, Х. Жермен, М. Сантос, Ичао Чжоу, С. Р. Рихтер и В. Колтун разработали метод под названием «Совместное обучение с мульти-масштабными проекционными потерями» [5].

Для оценки точности построения карты глубины были выбраны следующие метрики:

1. Средняя абсолютная погрешность (Mean absolute error) [6]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (1)$$

где n – количество пикселей на изображении карты глубины; y_i – расстояние для i -го пикселя на карте глубины, полученной с помощью модели DepthPro; \hat{y}_i – расстояние для i -го пикселя на эталонной карте глубины.

2. Средняя квадратичная погрешность (Rootmeansquareerror) [6]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (2)$$

3. Относительная погрешность [6]:

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i}. \quad (3)$$

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлено исходное изображение, поданное на вход модели.



Рис. 1. Исходное изображение

На рисунке 2. представлен результат построения карты глубины с помощью выбранной модели глубокого обучения. На рисунке слева изображена эталонная карта глубины, получен-

ная на основе данных с LiDAR. Посередине – карта глубины, полученная с помощью модели DepthPro.

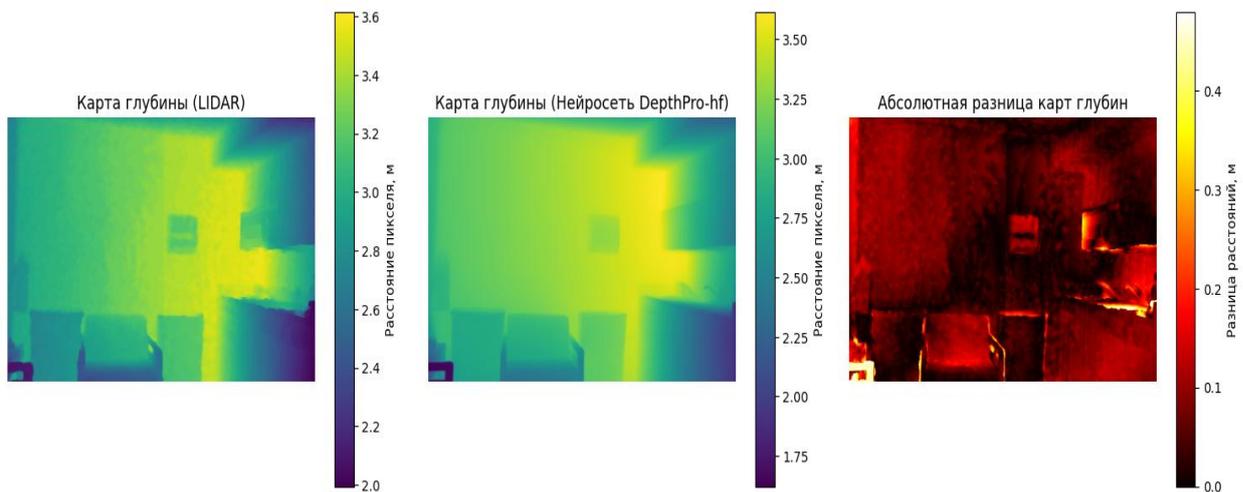


Рис. 2. Результат построения карты глубины на одном экземпляре

Справа на рис. 1 изображено слияние двух результатов для оценки погрешности построения карты глубины. С помощью градиента можно визуально оценить величину погрешности построения карты: там, где более темный оттенок – точность выше, где светлее – точность ниже.

Используя модель DepthPro были построены карты глубин для ряда изображений из датасета NYUv2. Оценивалась точность по выбранным метрикам, а также время построения карты глубины. На рис. 3 приведены результаты построения карты глубины в радиусе 3 метров от точки обзора, а на рис. 4 – в радиусе 4 метров.

Для выявления зависимости погрешности от максимального расстояния точек на исходном изображении был проведен ряд опытов, при которых на вход модели подава-

лись изображения с разной максимальной возможной глубиной – от 1 до 5 метров. Результат приведен на рис. 5.

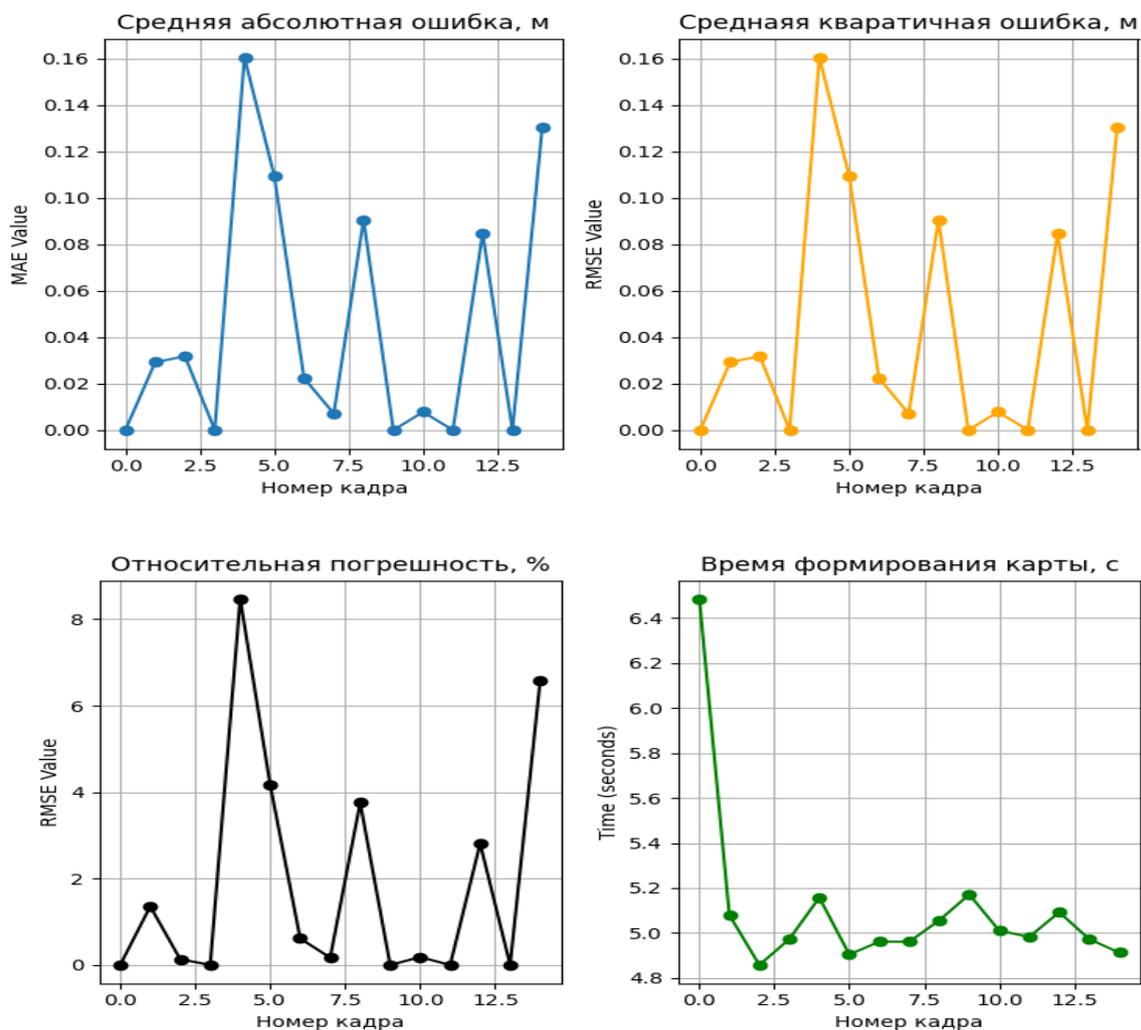


Рис. 3. Оценка точности карты глубины в радиусе не более 3 метров

В таблице приведены замеры целевых метрик для анализа качества построения карт глубин с помощью нейросетевого метода.

Оценка качества построения карты глубины на расстоянии 3–4 метра

Метрика	Эталонный метод	DepthPro
Относительная погрешность, %	3	7
Затрачиваемая оперативная память, МБ	373	1500
Время обработки, с	0,9909	5,016

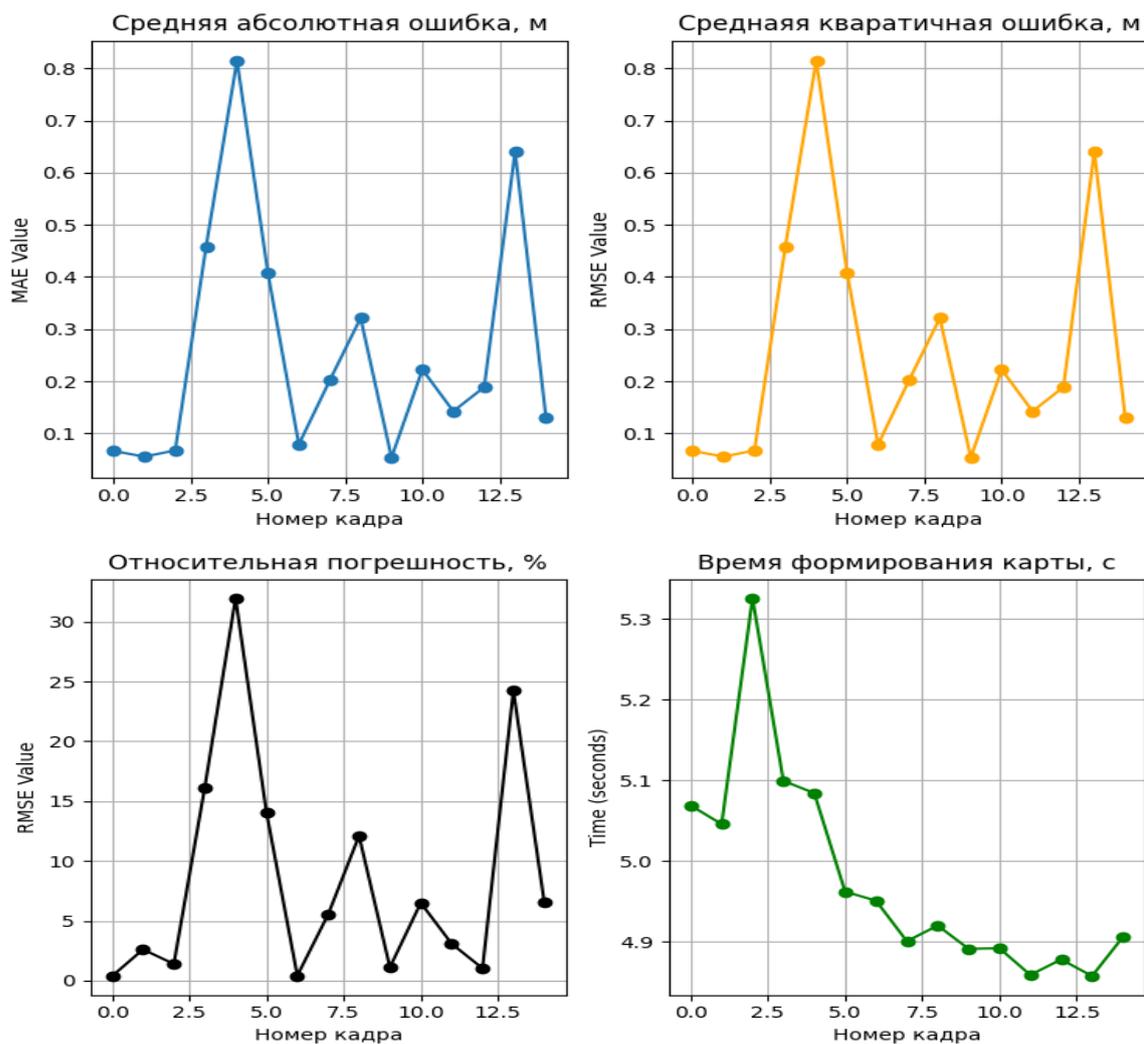


Рис. 4. Оценка точности карты глубины в радиусе не более 4 метров

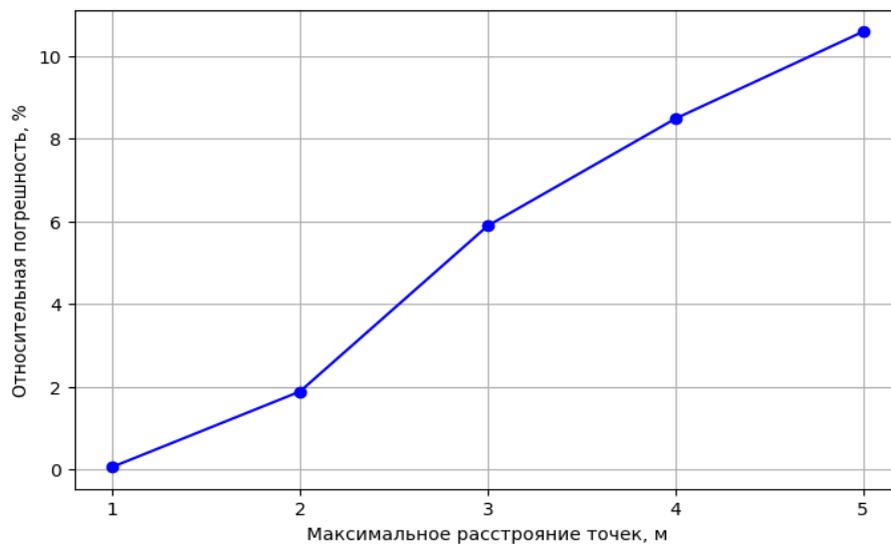


Рис. 5. Изменение относительной погрешности карты глубины в зависимости от максимального расстояния точек

Выводы

Проведенное исследование демонстрирует, что метод построения карт глубины на основе нейронной сети DepthPro обеспечивает точность и скорость обработки, сопоставимую с данными, полученными от LiDAR на расстоянии не более 3-4 метров (погрешность – не более 8%, скорость обработки ~5 секунд), что достаточно для колесного робота на небольших и средних дистанциях. Это подтверждается расчетом метрик (MAE, RMSE, относительная погрешность) на выборке датасета NYUv2. Основным фактором, влияющим на точность, является максимальная глубина сцены: с ее увеличением погрешность оценки возрастает. Таким образом, нейросетевой метод построения карт глубины является перспективной и экономически эффективной альтернативой для задач ориентации робототехнических систем в пространстве в условиях ограниченной дальности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пирогов, М. А. Сравнение методов построения карт глубины из изображений: нейронные сети vs стереопара / М. А. Пирогов // Вестник УрФУ. Серия «Математика. Механика. Информатика». – 2023. – № 4. – С. 45–58.
2. Иванов, С. Б. Выбор оптимальной архитектуры сверточных нейросетей для задач компьютерного зрения / С. Б. Иванов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2021. – Т. 29, № 3. – С. 123–134. – Режим доступа: cyberleninka.ru.
3. Бакулин, М. С. Модели глубокого обучения для решения задач компьютерного зрения : бакалаврская работа / М. С. Бакулин. – 2024. – 42 с. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/140541/1/m_th_s.a.bakulin_2024.pdf (дата обращения: 17.11.2025)
4. NYU Depth V2Nathan Silberman. URL: https://cs.nyu.edu/~fergus/datasets/nyu_depth_v2.html (дата обращения: 16.11.2025).
5. Bochkovskii A. et al. Depth pro: Sharp monocular metric depth in less than a second //arXiv preprint arXiv: 2410.02073. – 2024.
6. Metrics and scoring: quantifying the quality of predictions URL: https://sklearn.org/stable/modules/model_evaluation.html (дата обращения: 16.11.2025)

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025
The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 539.261, 620.187, 691.75

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-81-84

Научная статья

Original article

М. Ю. Козенко, А. П. Порхун, А. А. Яковлев

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Александр Прокофьевич Порхун, sa.porkhun30@gmail.com

Аннотация. В данной обзорной статье представлен комплексный анализ современных исследований по применению технологического ультразвука в процессе послойного наплавления. Основное внимание уделяется механизмам ультразвукового воздействия на структуру и свойства формируемого материала.

Ключевые слова: аддитивное производство, метод послойное наплавления, ультразвук

Для цитирования: Козенко М. Ю., Порхун А. П., Яковлев А. А. Современное состояние ультразвуковой обработки в аддитивном производстве методом послойного наплавления. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 81–84. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-81-84

Информация об авторах:

Михаил Юрьевич Козенко – аспирант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ
e-mail: kozenkomichael1999@yandex.ru

Александр Прокофьевич Порхун – магистрант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ
e-mail: sa.porkhun30@gmail.com

Алексей Андреевич Яковлев – профессор, д-р техн. наук, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ
orcid.org/0000-0003-0861-9003
e-mail: yaa_777@mail.ru

Вклад авторов:

М. Ю. Козенко – написание текста статьи, участие в обсуждении результатов.

А. П. Порхун – написание текста статьи, подготовка сопроводительной документации.

А. А. Яковлев – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

M. Yu. Kozenko, A. P. Porkhun, A. A. Yakovlev

**THE CURRENT STATE OF ULTRASONIC PROCESSING
IN ADDITIVE MANUFACTURING BY LAYER-BY-LAYER FUSION**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Alexander P. Porkhun, sa.porkhun30@gmail.com

Abstract. This review article provides a comprehensive analysis of current research on the application of technological ultrasound in the process of layer-by-layer deposition. The main focus is on the mechanisms of ultrasonic effects on the structure and properties of the formed material.

Keywords: additive manufacturing, layer-by-layer welding, and ultrasound

For citation: Kozenko M. Yu., Porkhun A. P., Yakovlev A. A. The current state of ultrasonic processing in additive manufacturing by layer-by-layer fusion. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 81–84. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-81-84

Information about the authors:

Mikhail Yu. Kozenko – Postgraduate student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU
e-mail: kozenkomichael1999@yandex.ru

Alexander P. Porkhun – Master's student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU
e-mail: sa.porkhun30@gmail.com

Alexey A. Yakovlev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0003-0861-9003

e-mail: yaa_777@mail.ru

Contribution of the authors:

Mikhail Yu. Kozenko – writing the article and participating in the discussion of the results.

Alexander P. Porkhun – writing the article's text, preparing the accompanying documentation.

Alexey A. Yakovlev – defining the purpose of the work, participating in the discussion of the results.

Введение

Аддитивные технологии, в частности метод послойного наплавления (*FDM*), получили широкое распространение в различных отраслях промышленности благодаря своей гибкости и экономической эффективности при производстве сложных деталей. Однако дальнейшее развитие технологии сталкивается с фундаментальными ограничениями, такими как выраженная анизотропия механических свойств, неудовлетворительное качество боковой поверхности и необходимость использования поддерживающих структур.

Если десятилетие назад основные научные и инженерные усилия были сосредоточены на преодолении этих технологических барьеров, то в настоящее время наметилась тревожная тенденция. Рыночный фокус сместился в сторону удешевления и массовой автоматизации оборудования. Безусловно, это повышает доступность, но не решает ключевых физико-механических проблем, тем самым ограничивая потенциал технологии для создания высоконагруженных и ответственных изделий.

Ключевыми направлениями для преодоления являются управляемая укладка слоев, армирование волокнами, а также активное управление адгезией через температурный режим

камеры и параметры экструзии. В этом ряду особое, но недостаточно изученное место занимает применение технологического ультразвука. Несмотря на доказанную эффективность ультразвуковой обработки для управления структурой и свойствами материалов в других областях (например, в литье и сварке), высокий порог входа эту технологию без должного внимания в контексте *FDM*.

В связи с этим, целью данной обзорной статьи является систематизация и обобщение всего имеющегося научно-технического опыта по использованию ультразвука в *FDM*-технологии. Анализ существующих исследований позволит оценить текущий уровень развития метода, выявить его потенциальные преимущества для устранения ключевых недостатков *FDM* и определить наиболее перспективные векторы для будущих исследований в этой области.

Материалы и методы исследования

Данное исследование представляет собой систематический обзор научной литературы, направленный на выявление и анализ публикаций, посвященных применению ультразвука в технологии послойного наплавления (*FDM*).

Для сбора релевантных данных был проведен поиск в международных реферативных базах данных и поисковых системах, включая

Scopus, Web of Science, Google Академия и ScienceDirect. Период поиска охватывал публикации за последние 15 лет (2009–2024 гг.). Использовались следующие ключевые слова и их комбинации на английском и русском языках: «Fused Deposition Modeling», «FDM», «Fused Filament Fabrication», «FFF», «ultrasonic assistance», «ultrasonic vibration», «ultrasonic consolidation», «additive manufacturing», «3D printing», «ультразвук», «аддитивное производство», «послойное наплавление».

Методология анализа основана на системном подходе, направленном на всестороннее рассмотрение взаимосвязи между методом приложения ультразвукового воздействия, изменением структуры материала и конечными функциональными свойствами изготовленных образцов.

Первостепенное внимание уделялось стратегии интеграции ультразвука в процесс FDM. Были выделены и проанализированы основные схемы: воздействие на филамент перед входом в экструдер, прямое вибрирование сопла, контактное ультразвуковое воздействие на формируемый слой, а также обработка в специальной ультразвуковой камере.

Результаты исследования и их обсуждение

Стратегии интеграции ультразвука демонстрируют значительное разнообразие. Наиболее распространенным является метод ультразвукового вибрирования субстрата, при котором высокочастотные колебания передаются на формируемое изделие через платформу [2]. В качестве альтернативы применяется подход с креплением пьезоэлектрического преобразователя непосредственно к экструдеру, что вызывает вибрацию сопла и воздействует на материал в момент экструзии [4]. Также исследуется концепция ультразвуковой постобработки уже сформированных образцов.

Что касается влияния на процесс и свойства, то ключевым следствием ультразвукового воздействия является повышение температуры в зоне контакта соседних дорожек и слоев [2]. Это явление, зафиксированное с помощью ИК-термографии, обусловлено двумя факторами: внутренним трением между макромолекулами полимера и поверхностным трением между укладываемыми нитями. Данный термоэффект способствует увеличению кинетической энергии полимерных цепей, что, в свою очередь, интенсифицирует их релаксацию, ретацию

и взаимную диффузию через границу раздела. Следствием этого является значительное улучшение адгезии между слоями, что подтверждается данными механических испытаний и микроструктурного анализа. Прочностные характеристики, такие как предел прочности при растяжении и изгибе, демонстрируют увеличение до 13.2 и 12.6 % соответственно для чистого PLA и впечатляющее улучшение более чем на 100 % для композитов PLA-НА. Кроме того, ультразвуковая вибрация способствует уплотнению, увеличивая площадь контакта между соседними дорожками и уменьшая размер пор в перекрывающихся областях, что ведет к снижению общей пористости образцов до 63.1 % [4].

Особый интерес представляет влияние ультразвука на композитные материалы. Высокочастотные колебания не только улучшают консолидацию полимерной матрицы, но и оказывают диспергирующее и измельчающее действие на армирующие частицы, как в случае с гидроксиапатитом. Это приводит к более однородному распределению частиц, разрушению их агломератов и, как следствие, к подавлению концентраторов напряжений, что вносит дополнительный вклад в улучшение механических свойств.

Важным технологическим результатом является снижение анизотропии механических свойств. Наибольший прирост прочности наблюдается у образцов, напечатанных с направлением заполнения в 90° , что существенно нивелирует разрыв между прочностными характеристиками в разных направлениях. Это открывает возможность увеличения скорости печати без ущерба для прочности, так как ультразвуковое воздействие компенсирует ухудшение межслойной адгезии, обычно вызываемое увеличением скорости.

Выводы

Проведенный анализ литературных данных свидетельствует о значительном прогрессе в исследованиях по интеграции технологического ультразвука в процесс послойного наплавления (FDM/FFF), наблюдавшемся в последние 2-3 года. Установлено, что ультразвуковое воздействие оказывает комплексное положительное влияние на ключевые аспекты технологии. К неоспоримым преимуществам метода относится существенное повышение механических характеристик изготовленных образцов, включая прочность на растяжение, изгиб и сжатие, вплоть до значений, сопоста-

вимых с литыми аналогами. Это достигается за счет одновременного воздействия на несколько факторов: ультразвуковая вибрация способствует увеличению площади контакта и улучшению межслойной адгезии за счет активации молекулярных цепей полимера и интенсификации их взаимной диффузии; приводит к снижению пористости благодаря уплотнению экструдированных дорожек; а в случае композитных материалов обеспечивает дополнительный эффект диспергирования и равномерного распределения армирующих частиц, снижая концентрацию напряжений.

Однако выявлены и потенциальные негативные эффекты, требующие параметров обработки. При определенных режимах, в частности при чрезмерной мощности, может наблюдаться явление кавитации в расплаве полимера, что, вопреки общей тенденции, способно привести к образованию микропор и деградации механических свойств [5].

Несмотря на доказанную эффективность, широкое внедрение ультразвуковой технологии сопряжено с рядом существенных технологических вызовов. Ключевым из них является требование к конструктивному исполнению элементов принтера, которые зачастую должны функционировать как части сложной резонансной системы, что представляет собой нетривиальную инженерную задачу. Значительные сложности также связаны с термостабилизацией системы, поскольку нагрев ультразвуковых

излучателей и рабочих органов в процессе печати приводит к изменению их резонансных характеристик, требующему применения систем активной компенсации частоты или прецизионного охлаждения. Таким образом, дальнейшее развитие данного направления лежит в области решения указанных конструкторско-технологических задач, что откроет путь к созданию нового поколения гибридных FDM-установок, позволяющих активно управлять структурой и свойствами изделий в процессе их синтеза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Effect of Ultrasonic Vibration on Interlayer Adhesion in Fused Filament Fabrication 3D Printed ABS / A. Tofangchi, P. Han, J. Izquierdo, A. Iyengar, K. Hsu // *Polymers*. – 2019. – Vol. 11, no. 5. – P. 1–10. – DOI: 10.3390/polym11020315.
2. Influence Mechanism of Ultrasonic Vibration Substrate on Strengthening the Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling / W. Wu, J. Li, J. Jiang et al. // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, № 5. – P. 904. – DOI: 10.3390/polym14050904.
3. Lam S. K. H., Ng T. L., Iqbal A. K. M. A., Leung C. K. Y., Kan C. W. Ultrasonic vibration-assisted 3D printing of continuous carbon fiber-reinforced polymer composites [Ультразвуковая 3D-печать непрерывных углекомполитов, армированных полимером] // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5. No. 5, Part 3. P. 11343–11350. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.104
4. Mechanical properties enhancement of 3D-printed HA-PLA composites using ultrasonic vibration assistance / P. Alhemaïti, H. Jiang, W. Aiyiti et al. // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2024. – Vol. 19, № 1. – P. e2346271. – DOI: 10.1080/17452759.2024.2346271
5. Grewell, D., Benatar, A., & Park, J. B. *Plastics and Composites Welding Handbook*. – Munich: Hanser Publishers, 2021. – 350 p.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025
The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025

УДК 62-791.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-84-87

Научная статья
Original article

А. А. Курилов, Д. В. Кимбор

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ КАЛИБРОВКИ ПЯТИОСЕВОГО 3D-ПРИНТЕРА НА ОСНОВЕ ТЕНЗОДАТЧИКА

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Даниил Васильевич Кимбор, daniil2001v@gmail.com

Аннотация. Для автоматической калибровки аддитивной установки предложено устройство, которое обеспечивает снижение времени процесса калибровки и повышение ее точности. Описаны существующие устройства и методы проведения процесса калибровки в аддитивных установках, а также конструктивные особенности и принцип работы разработанного устройства.

Ключевые слова: автоматическая калибровка, сопло, платформа, печать

Для цитирования: Курилов А. А., Кимбор Д. В. Разработка принципов калибровки пятиосевого 3D-принтера на основе тензодатчика. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 84–87. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-84-87

Информация об авторах:

Александр Александрович Курилов – магистрант, кафедры «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: aleksandrkurilovd@gmail.com

Даниил Васильевич Кимбор – аспирант, кафедры «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: daniil2001v@gmail.com

Вклад авторов:

А. А. Курилов – определение цели работы, разработка алгоритма калибровки на основе тензодатчика, написание текста статьи.

Д. В. Кимбор – поиск решений для калибровки 3D-принтеров, участие в разработке алгоритма калибровки на основе тензодатчика.

A. A. Kurilov, D. V. Kimbor

**DEVELOPMENT OF CALIBRATION PRINCIPLES FOR
A FIVE-AXIS 3D PRINTER BASED ON A STRAIN GAUGE**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Daniil V. Kimbor, daniil2001v@gmail.com

Abstract. Automatic calibration for additive machine device was proposed that reduces process duration and increases its accuracy. The existing devices and methods for carrying out the calibration process in additive machines are described, as well as the design features and operating principle of the developed device.

Keywords: automatic calibration, nozzle, platform, printing

For citation: Kurilov A. A., Kimbor D. V. Development of calibration principles for a five-axis 3D printer based on a strain gauge. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 84–87. doi.org/10.3521/1990-5297-2026-1-308-84-87

Information about the authors:

Aleksandr A. Kurilov – Master's student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: aleksandrkurilovd@gmail.com

Daniil V. Kimbor – Graduate student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

E-mail: daniil2001v@gmail.com

Contribution of the authors:

Aleksandr A. Kurilov – defining the purpose of the work, developing a calibration algorithm based on a strain gauge, writing the text of the article.

Daniil V. Kimbor – search for solutions for calibration of 3D printers, participation in the development of the algorithm.

Введение

Аддитивные технологии прочно вошли в промышленное производство, однако их развитие не стоит на месте [1]. Важным фактором, обеспечивающим качество печати в аддитивных установках, является точное позиционирование сопла печатающей головки относительно рабочей платформы или оснастки. Неправильно выставленный зазор приводит к дефектам первого слоя, нарушению адгезии и, как следствие, браку всей детали.

Отличительной особенностью многоосевых аддитивных установок является то, что для их калибровки используется датчик с несколькими степенями свободы и калибровочный шаблон. Процесс калибровки в таких аддитивных установках требует ручных операций, значительно времени, высокой квалификации оператора и не гарантирует повторяемости результата.

Таким образом, актуальной задачей является разработка системы автоматической калибровки, позволяющей исключить человеческий фактор, повысить точность и сократить время наладки оборудования.

**Анализ известных подходов
к решению задачи**

Средства для проведения процесса калибровки в аддитивных установках разрабатывались и изучались многими научными коллективами и компаниями. В исследовании [2] был представлен датчик *BL touch*, который построен на базе датчика эффекта Холла, который реагирует на изменения магнитного поля. В выходящий из корпуса щуп соединен с магнитом, который и взаимодействует с датчиком Холла в процессе автокалибровки. Сам щуп при снятии показаний контактирует непосредственно

с поверхностью стола, опускаясь ниже сопла. В процессе автокалибровки печатающая головка принтера с закрепленным датчиком перемещается от точки к точке по всей поверхности стола. В каждой точке головка принтера опускается к нагревательному столу, а *BL Touch* делает замеры, после чего головка принтера перемещается в следующую точку. Таким образом формируется сетка высот поверхности стола. Недостатком данного устройства является возможность измерения расстояния только в вертикальном направлении и иногда возникающие ложные срабатывания.

В решении [3] рассматривается способ калибровки с помощью индуктивного датчика. Принцип работы индуктивного датчика заключается в измерении магнитного поля, меняющегося при появлении поблизости металлического предмета. Датчик фиксируют на печатающую головку принтера, как и *BL Touch*.

Индуктивный датчик обладает теми же недостатками, что и *BL touch*, а также он реагирует только на металлические поверхности.

В качестве датчика калибровки может использоваться оптический концевик. В основном их используют для установки нулевого положе-

ния по осям в 3D-принтерах, но также можно использовать для автокалибровки стола. В рабочей области датчика проходит инфракрасный луч, его наличие фиксируется сенсором с другой стороны рабочей области. Если поток света прервать, концевой выключатель это зафиксирует.

Среди недостатков данного датчика можно отметить появление ложных срабатываний при сильных вибрациях и выход из строя светодиода со временем.

В системе автоматической установки датчика калибровки [4] используется датчик с концевым выключателем. Устройство работает следующим образом. Печатающая головка вместе с датчиком перемещается по всей поверхности стола от точки к точке. В каждой точке печатающая головка с датчиком опускается до стола, датчик фиксирует координаты, после чего происходит перемещение к следующей точке. Таким образом, строится карта высот поверхности. К недостаткам данной системы можно отнести то, что необходимо настраивать смещение сопла относительно датчика, невысокую повторяемость и точность.

Сравнительные характеристики ранее описанных датчиков представлены в таблице.

Характеристики датчиков калибровки

Датчик	<i>BL touch</i>	Индуктивный	Оптический	Концевой выключатель
Тип датчика	Контактный	Бесконтактный	Бесконтактный	Контактный
Материал срабатывания	Любой	Металл	Все, кроме прозрачных	Любой
Реакция на боковые касания	нет	нет	нет	да
Необходимость настройки смещения относительно сопла	да	да	да	да

Все рассмотренные датчики обладают ограниченным функционалом, который не позволяет использовать их в многоосевых аддитивных установках, требующих фиксации боковых касаний. Кроме того, данные датчики требуют задания смещения между ними и соплом.

Схема предлагаемого устройства

Для повышения скорости и точности калибровки многоосевых принтеров и избавления от ручных операций в процессе калибровки, предложено устройство (рис. 1), которое состоит из основания 1 печатающей головки, крепления радиатора 2, тензодатчика 3, фитинга 4, радиатора 5, термобарьера 6, нагревательного блока 7, сопла 8.

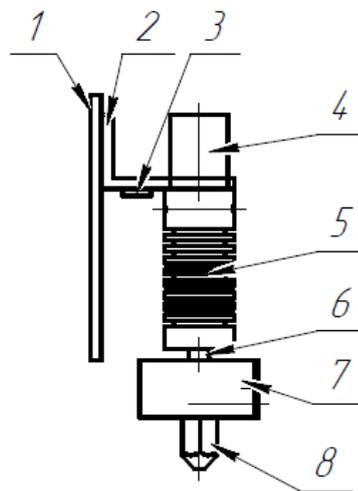


Рис. 1. Схема устройства калибровки

В качестве контактного элемента в устройстве используется само сопло δ , а тензодатчик 3 позволяет фиксировать радиальное и осевое воздействие на сопло. Тензодатчик 3 регистрирует изгиб крепления радиатора 2 . Полученные данные от тензодатчика 3 обрабатываются платой управления аддитивной установки, затем на основе полученной информации выставляется необходимый зазор между соплом δ и поверхностью, на которой осуществляется печать изделий.

Алгоритм работы устройства

Для управления работой устройства был разработан алгоритм, который состоит из двух основных этапов: калибровка по оси A и калибровка по оси C . Алгоритм калибровки осей X , Y и Z рассматривать не будем, так как он такой же, как и в большинстве 3D-принтеров.

Устройство работает следующим образом. После калибровки осей X , Y и Z начинается процесс калибровки оси A , при котором печатающая головка перемещается вдоль оси A и касается шаблона в двух контрольных точках. Далее на основе полученных координат первой и второй контрольных точек производится коррекция оси A . Алгоритм повторяется до тех пор пока координаты контрольных точек по оси Z не станут равны (рис. 2).

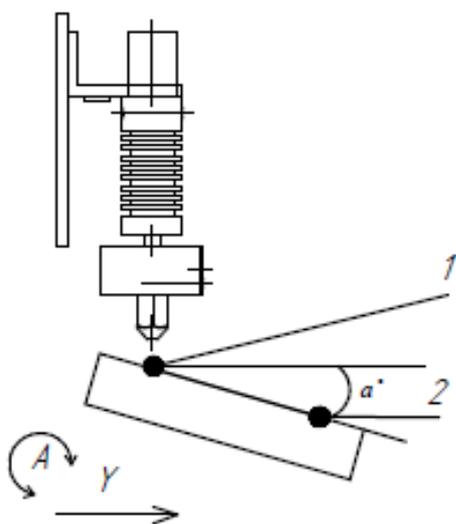


Рис. 2. Калибровка оси A

После калибровки по оси A запускается алгоритм калибровки по оси C , который выглядит следующим образом (рис. 3). Печатающая головка перемещается по оси X до касания калибровочного шаблона в первой контрольной

точке $P1$, затем она перемещается до второй контрольной точки $P2$.

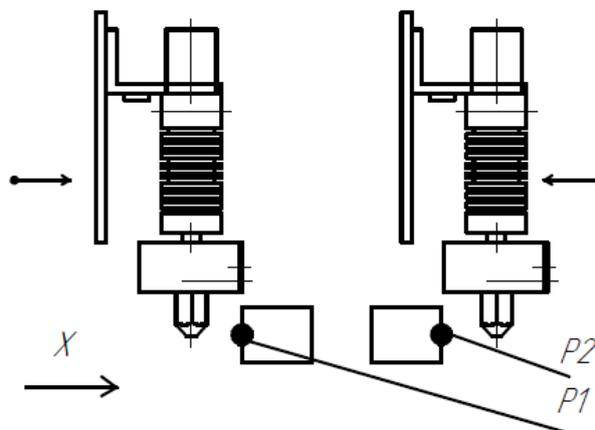


Рис. 3. Калибровка оси C

После чего происходит фиксация координат второй контрольной точки $P2$, затем печатающая головка поднимается вверх и далее на основе полученных координат контрольных точек производится коррекция оси C . Алгоритм повторяется до тех пор, пока координаты контрольных точек по оси X не станут равны.

Выводы

В устройстве применен новый способ расположения тензодатчика на печатающей головке, а также разработан алгоритм управления устройством калибровки. Использование тензодатчика позволит избежать задания расстояния между чувствительным элементом и соплом. Предложенная система позволит повысить производительность многоосевой аддитивной установки и сократить время процесса калибровки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Srinivasulu Reddy K. Additive manufacturing technologies / K. Srinivasulu Reddy, S. Dufera // Int. J. Manag. Inf. Technol. Eng. - 2016. - № 4. - P. 89-112.
2. Автоматическая калибровка стола 3D-принтера [Электронный ресурс] // 3D-DIY. – 2023. – URL: <https://3d-diy.ru/blog/raznovidnosti-sistem-avtokalibrovki-stola-3d-printera/> (дата обращения: 20.11.2025).
3. Система автоматической калибровки 3D-принтера [Электронный ресурс] // Top 3D Group. – 2024. – URL: https://tp3d.ru/index.php?route=reco-rd/record&record_id=59 (дата обращения: 20.11.2025).
4. Курилов, А. А. Повышение производительности пятиосевой аддитивной установки за счет автоматизации процесса калибровки / А. А. Курилов, И. А. Генералов, А. В. Дроботов // Известия ВолГТУ : научный журнал № 1(296) / ВолГТУ. – Волгоград, 2025. – С. 78–81.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025.

УДК 62-229.7

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-88-92

Научная статья

Original article

*А. А. Левковская, А. В. Дроботов***МЕХАНИЗМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СМЕНЫ ОСНОВАНИЙ
ДЛЯ ПЕЧАТИ В МНОГООСЕВОЙ АДДИТИВНОЙ УСТАНОВКЕ****Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Алексей Владимирович Дроботов, a_drobotov@vstu.ru

Аннотация. Для обеспечения автоматического снятия напечатанного изделия и установки нового основания для печати в многоосевой аддитивной установке предложен механизм, что обеспечивает повышение производительности процесса печати. Описаны существующие механизмы автоматической смены инструмента в станках, а также конструктивные особенности и принцип работы разработанного механизма.

Ключевые слова: многоосевой принтер, автоматизация, 3D-печать, 5D-печать, автоматическая смена инструмента

Для цитирования: Левковская А. А., Дроботов А. В. Механизм автоматической смены оснований для печати в многоосевой аддитивной установке. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 88–92. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-88-92

Информация об авторах:

Анастасия Анатольевна Левковская – студент, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: levkovskaya04@list.ru

Алексей Владимирович Дроботов – доцент, канд. техн. наук, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0003-1148-0495

e-mail: a_drobotov@vstu.ru

Вклад авторов:

А. А. Левковская – анализ известных методов решения задачи, проектирование предлагаемой установки, оформление статьи.

А. В. Дроботов – определение цели работы, принципиальное устройство предлагаемой установки, корректировка текста статьи.

*A. A. Levkovskaya, A. V. Drobotov***AUTOMATIC CHANGING MECHANISM OF PRINTING
BASE IN A MULTI-AXIS ADDITIVE SYSTEM****Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Alexey V. Drobotov, a_drobotov@vstu.ru

Abstract. The automatic removal of the printed product and the installation of a new printing base in a multi-axis additive installation is suggested, a mechanism has been proposed that improves the productivity of the printing process this way. The existing mechanisms of automatic tool change in machines are described, as well as the design features and the principle of operation of the developed mechanism.

Keywords: multi-axis printer, automation, 3D-printing, 5D-printing, automatic tool change

For citation: Levkovskaya A. A., Drobotov A. V. Automatic changing mechanism of printing base in a multi-axis additive system. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 88–92. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-88-92

Information about the authors:

Anastasiya A. Levkovskaya – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: levkovskaya04@list.ru

Alexey V. Drobotov – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0003-1148-0495

e-mail: a_drobotov@vstu.ru

Contribution of the authors:

Anastasiya A. Levkovskaya – analysis of known methods for solutionthe problem, design of the proposed installation, article design.

Alexey V. Drobotov – definition of the purpose of the work, the basic structure of the proposed device, article text correction.

Введение

Развитие аддитивных технологий закономерно движется в сторону создания полностью автоматизированных производственных ячеек, способных работать в режиме минимального вмешательства оператора, частично за счет автоматического извлечения напечатанных изделий из камеры 3D-принтера [2, 4]. Многоосевые аддитивные установки представляют собой высокотехнологичные устройства, способные создавать сложные детали с высокой точностью и качеством, однако их производительность ограничена необходимостью ручной смены оснований для печати. Эта операция ведет к существенному удлинению производственного цикла и снижению общей эффективности. В этой работе предлагается механизм автоматической смены оснований, который позволит производить серию изделий без участия оператора, а также описан принцип его работы. Проблема, решаемая в данной работе – исключение ручного труда из цикла изготовления детали, что является основой для любого автоматизированного производства.

Анализ известных подходов к решению задачи

В станках с ЧПУ похожая задача была решена с помощью систем автоматической смены инструмента (АСИ). По конструктивному и компоновочному исполнению их делят на две группы.

1. С заменой всего шпиндельного устройства (револьверные шпиндельные головки). Они наиболее компактны и просты по конструкции и расположены, как правило, на шпиндельной бабке металлообрабатывающего станка. После перемещения в рабочее положение один из шпинделей становится приводным, получает вращение от главного привода.

2. Со сменой инструмента в одном шпинделе (инструментальные магазины). В станках сверльно-фрезерного расточного типа наибольшее применение получили системы АСИ с использованием инструментальных магазинов с размещением в них до 200 инструментов [3]. Они делятся на дисковые, барабанные и цепные:

– дисковые магазины выполняют с вертикальной, горизонтальной и наклонной осями поворота, они представляют собой диски с выполненными на торцевой поверхности гнездами (ячейками) для инструментальных оправок, в дисковых магазинах можно разместить срав-

нительно небольшое количество инструментов, обычно не более 30;

– барабанные инструментальные магазины бывают с вертикальной осью поворота и горизонтальной, инструмент устанавливается в ячейки вместе с оправкой, инструментальные оправки ориентируют по образующей, емкость таких магазинов от 16 до 72 инструментов;

– цепные инструментальные магазины представляют собой ячейки для хранения от 16 до 360 инструментов, соединенных между собой транспортной цепью, перемещающейся по направляющим, они могут быть горизонтальными, вертикальными, наклонными, прямоугольными, треугольными, квадратными и более сложной формы, что обеспечивает возможность легкого доступа к магазину для загрузки инструментов и компактность конструкции.

Принцип работы цепного инструментального магазина представляется наиболее рациональным для использования в многоосевых аддитивных установках для организации механизма автоматической смены основания для печати. Однако, в отличие от металлообрабатывающих станков, он должен осуществлять не только функцию подвода основания для печати, но и расфиксацию/фиксацию цанги, извлечение основания с напечатанным изделием, вставку нового основания в цангу.

Схема предлагаемого механизма

Рабочий цикл разработанного механизма автоматической смены оснований для печати в многоосевой аддитивной установке, показанный на рис. 1, начинается с расфиксации цанги 1, освобождающей основание 2 с готовым изделием. Затем цепной конвейер 3 наклоняется и установленным крючком 4 осуществляет съём основания 2 с ранее напечатанным изделием. Далее для перевода конвейера в режим пошагового поворота выдвигается фиксатор 5, после чего конвейер 3 проворачивается на один шаг, подводя позицию для установки нового основания 2. После вставки нового основания 2 конвейер 3 проворачивается еще на один шаг, фиксатор 5 входит в паз и фиксирует положение, а сам конвейер 3 возвращается в исходное горизонтальное положение.

На заключительном этапе происходит окончательная фиксация нового основания 2 цангой 1. Линейные перемещения конвейера 3 вперед-назад обеспечиваются механизмом на основе передачи винт-гайка.

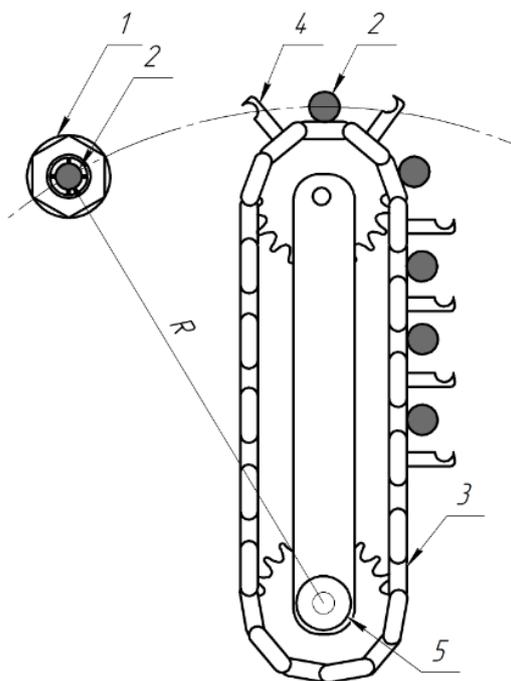


Рис. 1. Схема устройства автоматической смены оснований

Разработка конструкции устройства

Цикл смены основания начинается с расфиксации цанги 1. По окончании печати система управления подает сигнал на пушпульный соленоид (рис. 2), и он выдвигает свой вал. Система управления формирует управляющее воздействие на шаговый двигатель, цанга 1 начинает вращаться, и насадка встает в упор с соленоидом. Продолжая вращение, цанга 1 расфиксируется. Позднее, после смены основания, цанга 1 вращается в противоположную сторону, что приводит к фиксации основания.

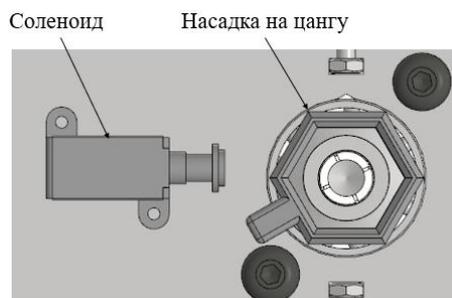


Рис. 2. Механизм фиксации/расфиксации цанги

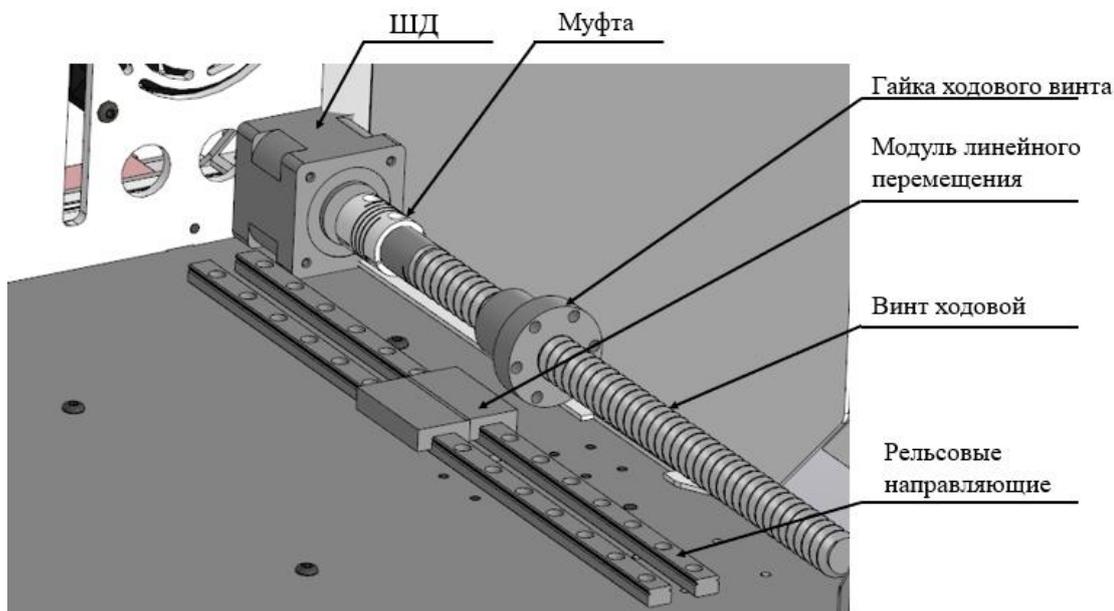


Рис. 3. Механизм линейного перемещения

Линейное перемещение системы происходит за счет шагового двигателя (ШД на рис. 3), который приводит в движение систему «винт-гайка». Перемещение гайки приводит в движение модуль линейного перемещения по рельсовым направляющим, где располагается цепной конвейер на шине.

Позиционирование основания происходит при помощи цепного конвейера, который изо-

бражен на рис. 4. На звеньях цепи располагаются патроны с основаниями и крючки для снятия готовых деталей.

На основании закреплен привод, который вращает нижнюю звездочку, жестко сцепленную для осуществления наклона системы. Фиксатор связывает нижнюю звездочку и шину, тем самым заставляя их двигаться как единое целое.

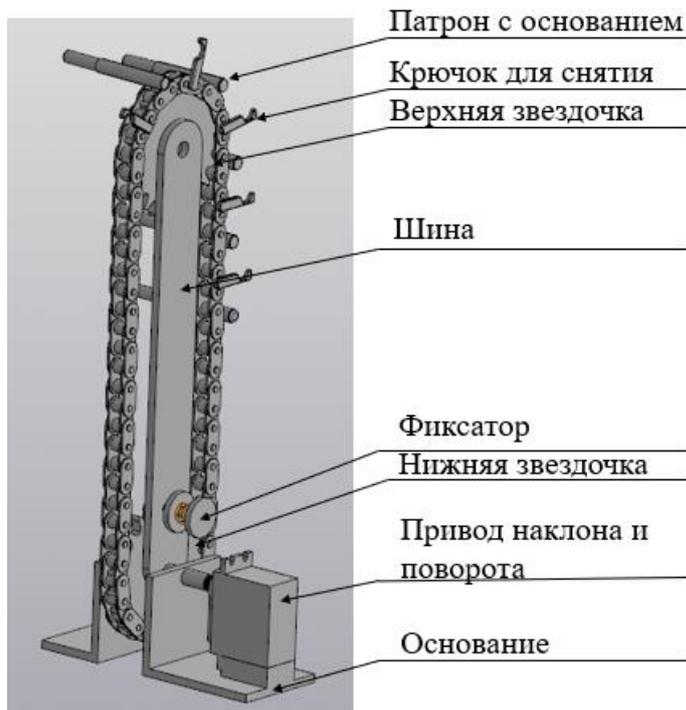


Рис. 4. Цепной конвейер

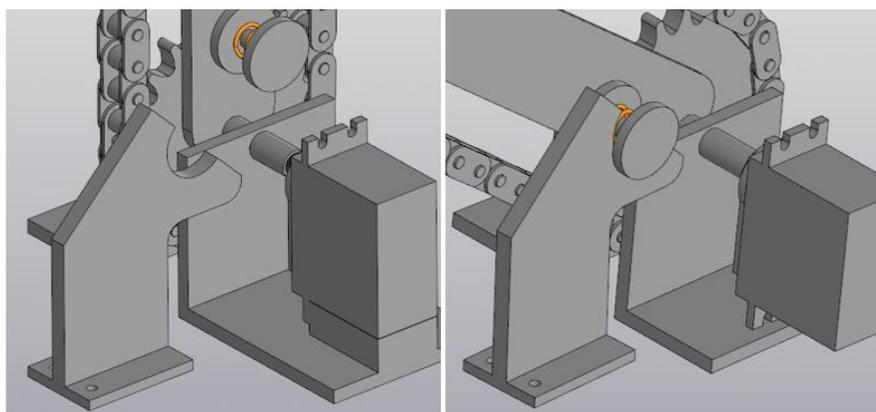


Рис. 5. Позиции конвейера для осуществления прокручивания и наклона

После снятия готовой детали, фиксатор входит в зацепление с упором, после чего система линейно перемещается к задней стенке принтера и фиксатор выходит из зацепления с шестеренкой. Это дает возможность прокручивать цепь на шаг. Подведя на главное положение патрон с основанием, линейным перемещением основание вставляется в цангу и отводится в сторону упора. Опять осуществляя прокручивание цепи, на главное положение подводится крючок, после чего фиксатор входит в зацепление с шиной и звездочкой. Система возвращается в вертикальное положение. На рис. 5 слева показана позиция, при которой конвейер может осуществлять наклон, а справа – позиция, при которой конвейер может прокручиваться на шаг.

Выводы

Разрабатываемая система позволит повысить производительность многоосевой аддитивной установки путем производства серии изделий без участия оператора. Кроме того, станет возможным обеспечение круглосуточной работы аддитивной установки, что увеличит производительность и коэффициент загрузки оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Strength increasing additive manufacturing fused filament fabrication technology, based on spiral toolpath material deposition / A. Avdeev, A. Shvets, I. Gushchin [et al.] // *Machines*. – 2019. – Vol. 7, No. 3. – P. 57. – DOI 10.3390/MACHINES7030057. – EDN VAKJJEJ.
2. Анализ способов автоматического снятия и извлечения напечатанных изделий из камеры 3D-принтера /

А. А. Шмелева, А. В. Омаров, С. С. Шемелюнас, А. В. Дроботов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (232) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – С. 76–78. – EDN FVUSXW.

3. Бушуев, В. В. Практика конструирования машин : справочник / В. В. Бушуев. – Москва : Машиностроение, 2006. – 403 с.

4. Организация очереди печати в 3D-принтерах с автоматическим извлечением изделий для мелкосерийного производства продукции / А. В. Дроботов, А. В. Омаров, С. С. Шемелюнас, И. А. Гушин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 1. – С. 6–9. – EDN NLJUSY.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025
The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025.

УДК 67.02
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-92-96

Научная статья
Original article

А. П. Порхун, Л. М. Шумейко, В. Г. Барабанов, Е. А. Дьяченко

РОТОРНАЯ АДДИТИВНАЯ УСТАНОВКА, РАБОТАЮЩАЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ FDM: ПРИНЦИП РАБОТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Александр Прокофьевич Порхун, sa.porkhun30@gmail.com

Аннотация. Проведенный анализ выявил основные проблемы аддитивного производства тел вращения, в частности, низкую скорость построения и образование ступенчатости и овальности на боковых поверхностях. В качестве решения предложена концепция роторного 3D-принтера, работающего по FDM-технологии. Данный подход позволяет организовать непрерывный процесс печати, что ведет к значительному росту производительности при изготовлении осесимметричных деталей.

Ключевые слова: аддитивная установка, FDM, тела вращения, овальность, 3D-принтер

Для цитирования: Порхун А. П., Шумейко Л. М., Барабанов В. Г., Дьяченко Е. А. Роторная аддитивная установка, работающая по технологии FDM: принцип работы и перспективы использования. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 92–96. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-92-96

Информация об авторах:

Александр Прокофьевич Порхун – магистрант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: sa.porkhun30@gmail.com

Леонид Максимович Шумейко – студент, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: sleonidik@mail.ru

Виктор Геннадьевич Барабанов – доцент, канд. техн. наук, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: vbarabanov@vstu.ru

Евгений Александрович Дьяченко – аспирант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: zhenya.dyachenko.1999@gmail.com

Вклад авторов:

А. П. Порхун – определение цели работы, обработка результатов, написание текста статьи, разработка концепции.

Л. М. Шумейко – экспериментальная печать, анализ дефектов принтеров при печати, составление результатов.

В. Г. Барабанов – определение цели работы, написание текста статьи, экспертная оценка.

Е. А. Дьяченко – консультация, анализ экспериментов, разработка концепции.

e-mail: zhenya.dyachenko.1999@gmail.com

A. P. Porkhun, L. M. Shumeyko, V. G. Barabanov, E. A. Dyachenko

ROTARY ADDITIVE MANUFACTURING MACHINE USING FDM TECHNOLOGY: OPERATING PRINCIPLE AND POTENTIAL APPLICATIONS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Alexander P. Porkhun, sa.porkhun30@gmail.com

Abstract. The analysis revealed the main problems of additive manufacturing of bodies of revolution, in particular, the low speed of construction and the formation of steps and ovality on the lateral surfaces. As a solution, the concept of a rotary 3D printer operating on FDM technology is proposed. This approach allows for the organization of a continuous printing process, which leads to a significant increase in productivity when manufacturing axisymmetric parts.

Keywords: additive manufacturing machine, FDM, solid of rotation, ovality, 3D printer

For citation: Porkhun A. P., Shumeyko L. M., Barabanov V. G., Dyachenko E. A. Rotary additive manufacturing machine using FDM technology: operating principle and potential applications. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 92–96. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-92-96

Information about the authors:

Alexander P. Porkhun – Master's student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU
E-mail: sa.porkhun30@gmail.com

Leonid M. Shumeyko – Student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU
e-mail: sleonidik@mail.ru

Viktor G. Barabanov – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU
e-mail: vbarabanov@vstu.ru

Evgeny A. Dyachenko – graduate student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU
e-mail: zhenya.dyachenko.1999@gmail.com

Contribution of the authors:

Alexander P. Porkhun – defining the purpose of the work, processing the results, and writing the article, concept development.

Leonid M. Shumeyko – experimental printing, analysis of printer defects during printing, and compilation of results.

Viktor G. Barabanov – defining the purpose of the work, writing the article, and expert evaluation.

Evgeny A. Dyachenko – Consultation, experiment analysis, concept development.

Введение

Современное аддитивное производство [1] развивается в направлении не только увеличения производительности, но и повышения точности. Особый интерес в данном контексте представляют тела вращения, широко распространенные в машиностроении, аэрокосмической отрасли и приборостроении. Несмотря на универсальность и доступность технологии послойного наплавления (FDM), ее применение для изготовления таких изделий сталкивается с системными ограничениями.

Перспективным решением является разработка роторной FDM-установки, в которой реализо-

ван переход от линейного перемещения инструмента к непрерывному вращению заготовки. Данный подход, аналогичный токарной обработке, позволяет повысить скорость синтеза, а также улучшить качество поверхности. Это позволит преодолеть ограничения традиционного FDM-метода по параметрам производительности, прочности и геометрической точности печати [2].

Материалы и методы исследования

На рисунке 1 представлены основные кинематические схемы 3D-принтеров [3], которые будут исследованы на возможность печати тел вращений.

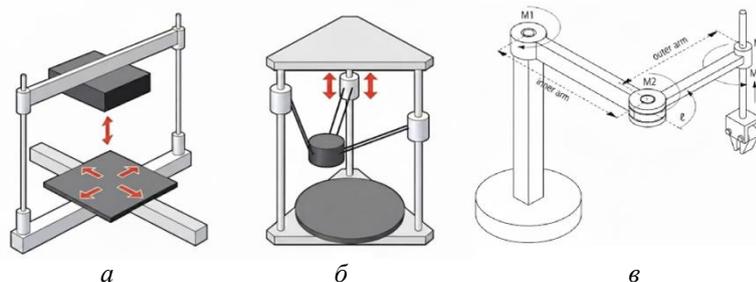


Рис. 1. Примеры кинематических схем 3D-принтеров:
а – декартовая кинематика; б – дельта кинематика; в – SCARA кинематика

Методика исследования заключается в анализе дефектов цилиндрических деталей после печати, представленных на рис. 2. Анализ характера этих дефектов позволяет идентифицировать причины их возникновения и оценить степень влияния на геометрическую точность и свойства готового изделия [4].

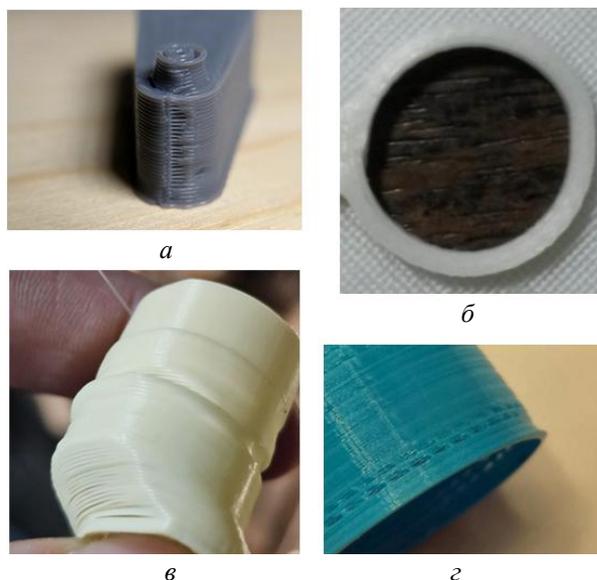


Рис. 2. Дефекты печати тел вращения:
а – ступенчатость; б – искажение формы (овальность);
в – расслоение; г – провисание

Результаты исследования и их обсуждение *Декартовы принтеры*

Овальность вертикальных цилиндров возникает преимущественно из-за люфтов в линейных подшипниках, ремнях и винтах, а также перекосов рамы. Частая смена направления движения по осям X и Y при печати кривых вызывает резонансные вибрации, искажающие форму и ухудшающие качество поверхности.

Дельта-принтеры

Геометрические искажения, в том числе переменная по высоте овальность цилиндров, обусловлены ошибками калибровки и нелинейностью кинематических преобразований. Точность печати существенно зависит от положения в рабочей зоне, достигая максимума в центре.

SCARA-принтеры

Данная кинематика, основанная на движении по истинной дуге, оптимальна для печати окружностей, поскольку исключает проблемы, присущие линейным системам (градиентность, вибрации). Однако погрешности изготовления, сборки и температурные эффекты приводят к кумулятивным ошибкам позиционирования, возрастающим с удалением от основания и усложнением траектории.



Рис. 3. CrealitiyK1

Для подтверждения данных выводов были проведены тестовые печати, а именно тест «Сердце Азамата» на различных принтерах с различными кинематическими схемами. Тест заключается в печати детали высотой 50 мм при смене направления перемещения каждые 5 мм. Результаты тестов представлены на рис. 3 и 4.

При анализе результатов тестов было выяснено, что на всех выбранных моделях принтеров возникает смещение слоев при изменении

направления. В качестве пути решения данной проблемы авторами была предложена конструкция аддитивной роторной установки, выполненной на основе полярной кинематики (рис. 5).

В полярной кинематике используются два основных элемента движения:

- вал вращения (ротор), который поворачивается вокруг своей центральной оси (ось R).
- продольное движение печатающей головки, которая движется вдоль оси X или Y.

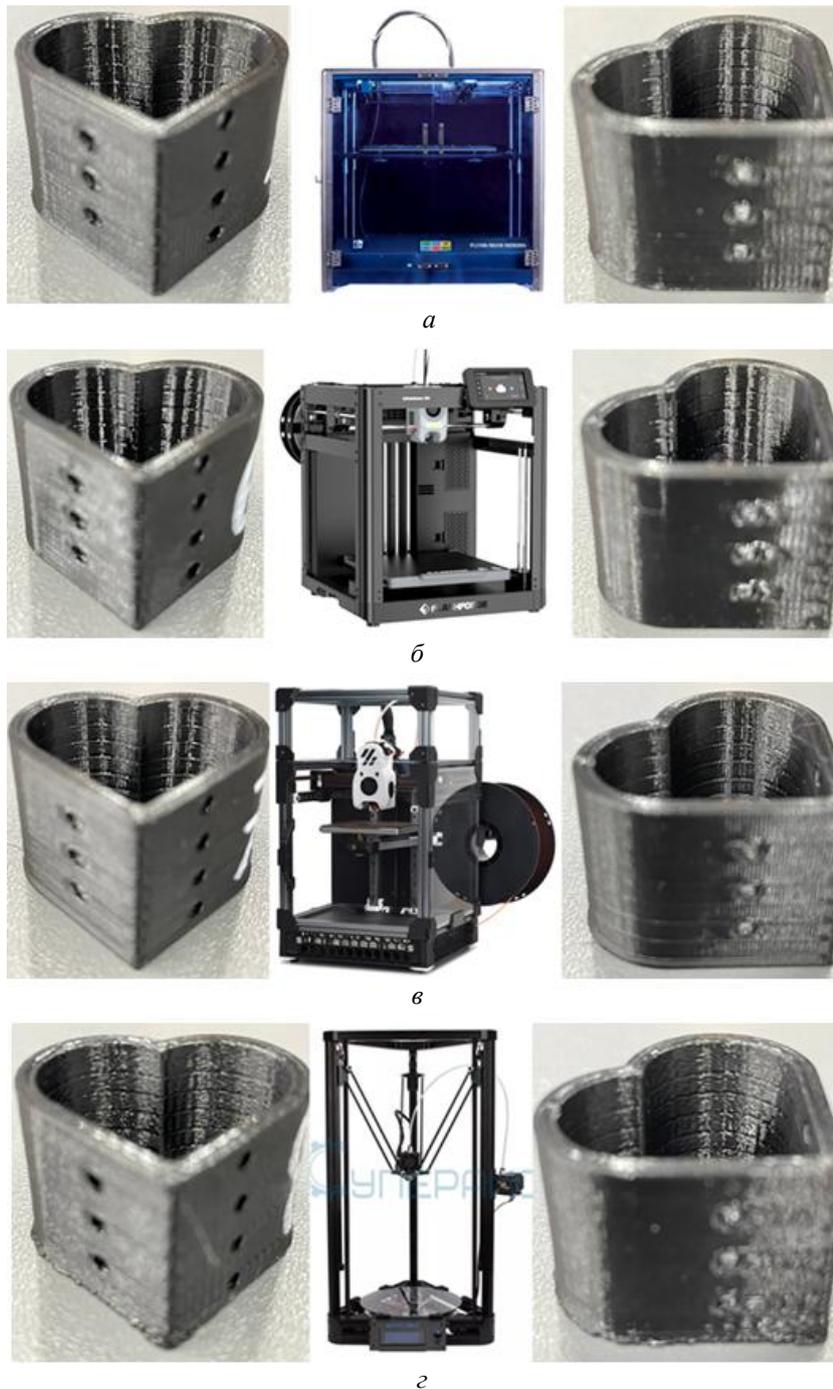


Рис. 4. Результаты тестов на различных принтерах:
а – FlyingBear Reborn; *б* – Flashforge adventurer 5m; *в* – VORON 0.2; *г* – Delta 3D принтер AnycubicKossel

Так как основные движущиеся части располагаются в центре, полярные 3D-принтеры могут быть более компактными. Но управление движением в полярных координатах может быть менее интуитивным и требовать специального программного обеспечения.

В 3D-принтере предполагается использование трех узлов шаговых двигателей – один для управления углом поворота ротора, второй

и третий, используемые для передвижения печатающей головки вдоль оси Y и Z . Программное обеспечение преобразует координаты XYZ в полярные координаты (угол, радиус), чтобы управлять движением печатающей головки. Двигатели перемещают печатающую головку в нужных координатах вдоль направляющей для создания требуемого изделия, которое формируется на печатающем вале.

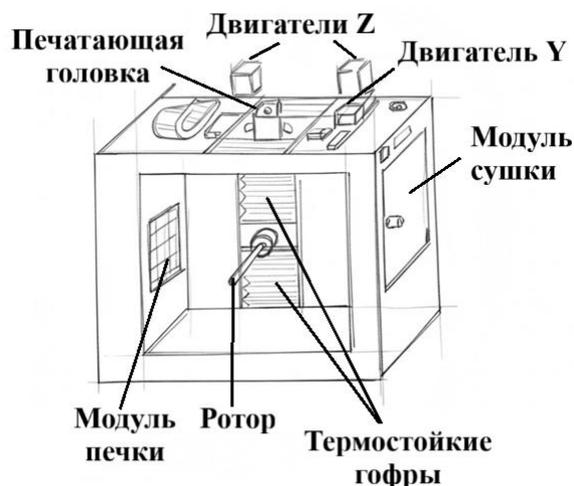


Рис. 5. Эскиз роторной аддитивной установки

Выводы

Проведенный анализ позволяет констатировать, что внедрение роторной аддитивной установки в FDM-технологии представляет собой перспективное направление для решения проблем, связанных с изготовления тел вращения, обширно представленных в производстве.

В результате проведенной работы было составлено техническое задание для разработки роторной аддитивной установки (таблица).

Параметр	Значение для Rotor
Технология печати	FFF/FDM
Размеры рабочей зоны (диаметр × глубина)	300/250
Максимальная температура рабочей камеры	250°C
Максимальная температура экструдера	500°C
Диаметр расходного материала	1.75±0.2
Количество экструдеров	1
Система охлаждения термобарьера	Жидкостная
Калибровка печатающего вала	автоматическая
Тип термокамеры	Закрытый с принудительным подогревом
Тип управления	Сенсорный экран
Совместимость с программным обеспечением	СтереотекСлайсер
InputShaping	+
Аварийная кнопка(разрывающая цепь питания)	+
Простой доступ к обслуживанию Z	+
Макс. скорость печати	не менее 100мм/с

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ Р 57558–2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы: национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : введен впервые : дата введения 1.12.2017 / ФГУП «ВИАМ». – Москва : Стандартинформ, 2020. – 16 с.
- Гибсон, И. Аддитивные технологии. 3D печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / И. Гибсон, Д. Розен, Б. Штукер ; пер. с англ. под ред. В. В. Нелюбина. – Москва : Техносфера, 2021. – 732 с.
- Разновидности кинематик FDM 3D-принтеров. – Текст : электронный // 3D-DIY: сайт. – URL: <https://3d-diy.ru/blog/raznovidnosti-kinematik-fdm-3d-printerov/> (дата обращения: 23.10.2025)
- Латышев, П. А. Исследование влияния режимов FDM-печати на анизотропию механических свойств полимерных изделий / П. А. Латышев, С. В. Иванов // Вестник машиностроения. – 2020. – № 8. – С. 67–72.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025
The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025.

УДК 001.51:621-023
DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-97-102

Научная статья
Original article

С. Г. Поступаева, А. А. Яковлев, А. Ю. Дуденков

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ПОДАЧИ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО СОТС ДЛЯ СВЕРЛИЛЬНОГО СТАНКА**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Светлана Геннадиевна Поступаева, posvetlana@mail.ru

Аннотация. Спроектировано устройство регулируемой подачи СОТС для вертикально-сверлильного станка. Построена модель физического принципа действия устройства охлаждения зоны резания, на основе которой организована система автоматического регулирования температурным режимом процесса сверления. Предлагаемое устройство позволяет повысить стойкость инструмента при сверлении заготовок.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающее технологическое средство; модель физического принципа действия, система управления

Для цитирования: Поступаева С. Г., Яковлев А. А., Дуденков А. Ю. Система автоматического регулирования подачи двухкомпонентного СОТС для сверлильного станка. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 97–102. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-97-102

Информация об авторах:

Светлана Геннадиевна Поступаева – старший преподаватель, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-3752-3062

e-mail: posvetlana@mail.ru

Алексей Андреевич Яковлев – профессор, д-р техн. наук, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0003-0861-9003

e-mail: yaa_777@mail.ru

Антон Юрьевич Дуденков – магистрант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: tosha1net@yandex.ru

Вклад авторов:

С. Г. Поступаева – анализ модели ФПД устройства охлаждения зоны резания станка, разработка САР температурным режимом, написание текста статьи.

А. А. Яковлев – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

А. Ю. Дуденков – разработка модели ФПД устройства охлаждения зоны резания станка, написание текста статьи.

S. G. Postupaeva, A. A. Yakovlev, A. Yu. Dudenkov

**AUTOMATIC FEED CONTROL SYSTEM
FOR TWO-COMPONENT COTS FOR A DRILLING MACHINE**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Svetlana G. Postupaeva, posvetlana@mail.ru

Abstract. A device for adjustable coolant feed for a vertical drilling machine has been designed. A model of the physical operating principle of the cutting zone cooling device has been developed, which has been used to organize a system for automatic temperature control during the drilling process. The proposed device allows for increased tool life when drilling workpieces.

Keywords: cooling lubricant technological means; model of the physical principle of operation, control system

For citation: Postupaeva S. G., Yakovlev A. A., Dudenkov A. Yu. Automatic feed control system for two-component cots for a drilling machine. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 97–102. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-97-102

Information about the authors:

Svetlana G. Postupaeva – Senior lecturer, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0002-3752-3062

e-mail: posvetlana@mail.ru

Alexey A. Yakovlev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0003-0861-9003

e-mail: yaa_777@mail.ru

Anton Yu. Dudenkov – Master's student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: tosha1net@yandex.ru

Contribution of the authors:

Svetlana G. Postupaeva – analysis of the model of the FPD cooling device for the machine cutting zone, development of the automatic control system for the temperature regime, wrote the article.

Alexey A. Yakovlev – determined the purpose of the work, participated in the discussion of the results.

Anton Yu. Dudenkov – development of a model of a device for cooling the cutting zone of a machine tool, wrote the article.

Введение

Целью проектирования нового устройства регулируемой подачи СОТС в зону резания металлорежущего станка является повышение стойкости инструмента в процессе сверления деталей и улучшения санитарно-гигиенических условий труда на производстве.

На основе анализа существующих способов подачи СОТС в зону резания станков был выбран способ подачи двухкомпонентного СОТС [1].

Основным преимуществом данного способа выступает применение ионизированного воздуха в качестве смазывающего компонента СОТС, а для отвода теплоты от инструмента и детали – жидкости в распыленном состоянии.

Материалы и методы исследования

Для конструирования устройства с регулируемой подачей СОТС в зону резания вертикально-сверлильного станка применим инженерно-физический метод [2]. Согласно данному методу разрабатывается модель ФПД, которая представляет собой граф, вершины которого отображают рабочее тело в местах (характерных точках), где протекают термодинамические взаимодействия СОТС с поверхностями сверла и обрабатываемой детали. Данная модель позволяет декомпозировать проектируемое устройство на подсистемы, где критерием разбиения выступает рабочее тело, и функциональные модули по конструктивному признаку, обеспечивая тем самым взаимосвязь между подсистемами устройства. Разработанная модель ФПД представлена на рис. 1.

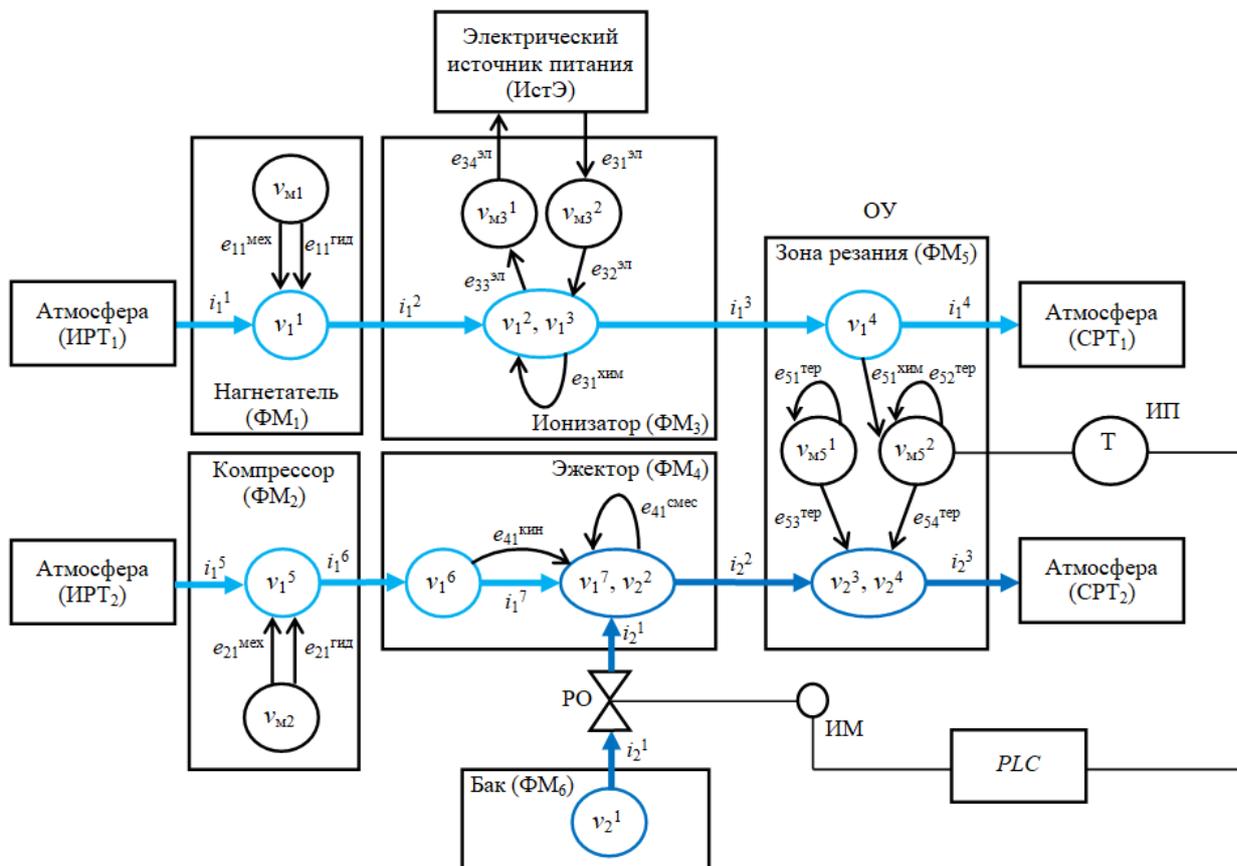


Рис. 1. Граф модели ФПД устройства с регулируемой подачей СОТС в зону резания вертикально-сверлильного станка

Согласно модели ФПД в проектируемом устройстве можно выделить две подсистемы: подсистему подачи ионизированного воздуха – рабочим телом выступает воздух (i_1) и подсистему

подачи распыленной жидкости – рабочим телом является распыленная жидкость (i_2). Подробное описание элементов модели ФПД (рис. 1) представлено в таблице.

Описание элементов модели ФПД

Обозначение элемента	Тип элемента	Семантическое описание
ИстЭ	Источник энергии	Электрический источник энергии
ИРТ ₁ , ИРТ ₂	Исток рабочего тела	Атмосфера
СРТ ₁ , СРТ ₂	Сток рабочего тела	Атмосфера
ФМ ₁	Функциональный модуль	Нагнетатель
ФМ ₂	То же	Компрессор
ФМ ₃	--/--	Ионизатор
ФМ ₄	--/--	Эжектор
ФМ ₅	--/--	Зона резания
ФМ ₆	--/--	Бак
ОУ	Объект управления	Зона резания станка
PLC	Регулятор	Микропроцессорное устройство управления
ИП	Измерительный преобразователь	Датчик температуры
ИМ	Исполнительный механизм	Электродвигатель
РО	Рабочий орган	Задвижка
v_1^1	Характерная точка	Воздух в рабочей камере нагнетателя
v_1^2, v_1^3	То же	Воздух в неионизированном и ионизированном состоянии в ионизаторе
v_1^4	--/--	Ионизированный воздух в зоне резания
v_1^5	--/--	Воздух в рабочей камере компрессора
v_1^6	--/--	Воздух в сопле эжектора
v_2^1	--/--	Жидкость в баке
v_1^7, v_2^2	--/--	Распыленная в воздухе жидкость в смесительной камере эжектора
v_2^3, v_2^4	--/--	Распыленная жидкость на инструменте и детали
$v_{м1}$	--/--	Колесо центробежного нагнетателя
$v_{м2}$	--/--	Колесо центробежного компрессора
$v_{м3}^1$	--/--	Материал катода
$v_{м3}^2$	--/--	Материал анода
$v_{м5}^1$	--/--	Сверло
$v_{м5}^2$	--/--	Деталь
i_1^1	Маршрутная дуга	Поток воздуха из атмосферы в камеру нагнетателя
i_1^2	То же	Поток воздуха из камеры нагнетателя в ионизатор
i_1^3	--/--	Поток ионизированного воздуха в зону резания
i_1^4	--/--	Поток ионизированного воздуха в атмосферу
i_1^5	--/--	Поток воздуха из атмосферы в камеру компрессора
i_1^6	--/--	Поток воздуха в сопло эжектора
i_1^7	--/--	Поток воздуха в смесительную камеру эжектора
i_2^1	--/--	Поток жидкости из бака в смесительную камеру

Окончание таблицы

Обозначение элемента	Тип элемента	Семантическое описание
i_2^2	-//-	Поток распыленной в воздухе жидкости в зону резания
i_2^3	-//-	Поток распыленной в воздухе жидкости в атмосферу
$e_{11}^{мех}, e_{21}^{мех}$	Взаимодействие	Процесс сжатия воздуха
$e_{11}^{гид}, e_{21}^{гид}$	То же	Процесс нагнетания воздуха
$e_{31}^{хим}$	-//-	Процесс ионизации воздуха
$e_{31}^{эл}, e_{32}^{эл}, e_{33}^{эл}, e_{34}^{эл}$	-//-	Электрическое взаимодействие
$e_{41}^{кин}$	-//-	Процесс передачи кинетической энергии воздуха подсосываемой жидкости
$e_{41}^{смес}$	-//-	Образование распыленной жидкости
$e_{51}^{хим}$	-//-	Процесс смазывания детали ионизированным воздухом
$e_{51}^{тер}, e_{52}^{тер}$	-//-	Нагревание инструмента и детали
$e_{53}^{тер}, e_{54}^{тер}$	-//-	Отвод тепла от инструмента и детали

Для обеспечения регулируемой подачи СОТС в зону резания сверлильного станка необходимо организовать систему автоматического регулирования (САР) температурным режимом процесса сверления. Для определения мест установки элементов САР в проектируемом устройстве также обратимся к разработанной модели ФПД.

Из рисунка видно, что целесообразно применить косвенный метод измерения температуры зоны резания – по температуре нагрева детали при обработке, расположив датчик темпе-

ратуры (ИП) как можно ближе к поверхности детали. Регулировать подачу охлаждающей жидкости на наружную поверхность детали можно с помощью рабочего органа (РО) задвижки, которую следует установить на входном потоке жидкости в смесительную камеру эжектора. Управление задвижкой осуществляется через исполнительный механизм (ИМ, например, электродвигатель) от системы микропроцессорного управления (PLC). В результате сформирована функциональная схема САР температурным режимом (рис. 2).

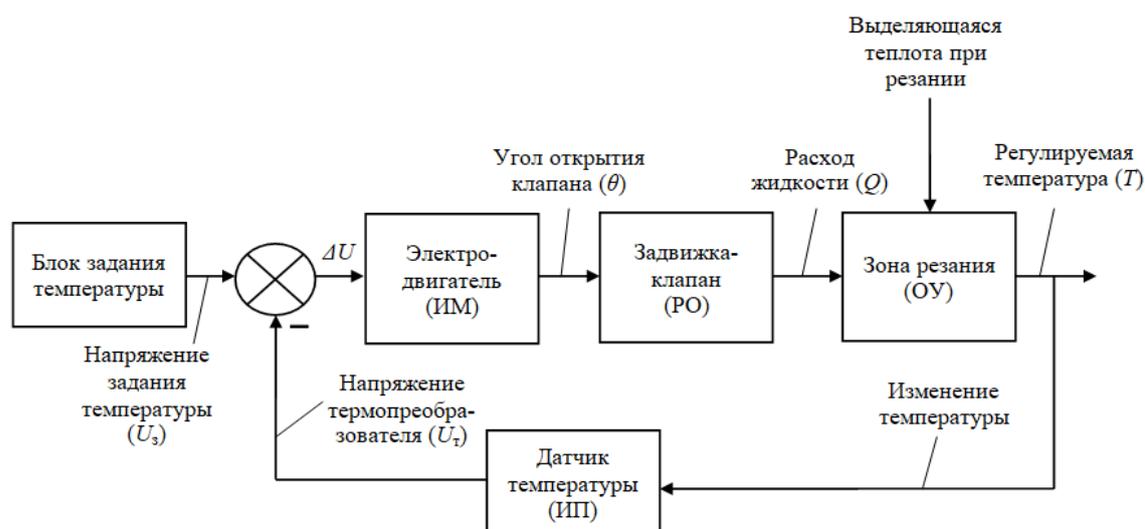


Рис. 2. Функциональная схема САР температурным режимом в зоне резания

Таким образом, САР температурным режимом при сверлении деталей является замкнутой одноконтурной стабилизирующей системой с отрицательной обратной связью по температу-

ре. Возмущающее воздействие в системе – выделяющаяся теплота при сверлении в зоне резания. Далее на основе полученной функциональной схемы (рис. 2) можно математически

описать элементы САР как типовых устройств автоматики [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Спроектированное устройство регулируемой подачи СОТС в зону резания сверлильного станка представлено на рис. 3.

Принцип действия устройства следующий. Обработка детали 1 (рис. 3), закрепленной

в приспособлении 2, осуществляется сверлом 3 посредством кондукторной втулки 4. Корпус 5 жестко закреплен с помощью кронштейна 6 относительно станка и приспособления 2. В ионизатор, электроды которого подключены к источнику электропитания 8, атмосферный воздух поступает от нагнетателя 7. В электрическом поле коронного разряда атмосферный воздух ионизируется и поступает в кольцевую камеру 9.

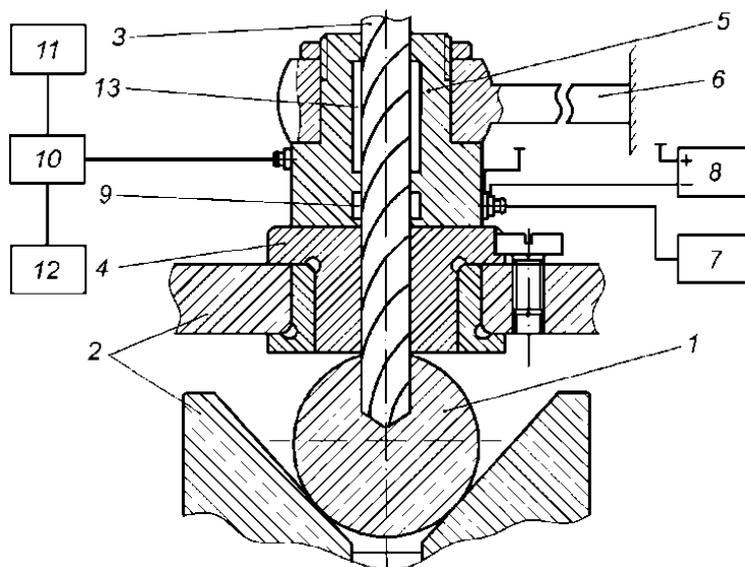


Рис. 3. Устройство регулируемой подачи СОТС в зону резания

В кольцевой камере 9 образуется вихревой поток, направление вращения которого совпадает с направлением вращения сверла 3. Ионизированный воздух, взаимодействуя с винтовыми канавками сверла, проникает в зону резания, выполняя смазывающую функцию СОТС. Жидкость от источника подачи жидкой среды 12 смешивается с атмосферным воздухом, поступающим от компрессора 11, в эжекторе 10, образуя, тем самым, поток охлаждающей распыленной жидкости и через тангенциальный сопловой ввод поступает в кольцевую камеру 13, где образуется вихревой поток, направленный против вращения сверла 3. Таким образом, происходит охлаждение инструмента и стружки.

Подача второго потока распыленной жидкости на наружную поверхность детали регулируется задвижкой. Управление температурным режимом процесса сверления происходит с помощью системы микропроцессорного управления.

Расход потока распыленной жидкости, поступающей на обрабатываемую деталь, регулируется задвижкой по сигналу от системы микропроцессорного управления.

Сигнал датчика температуры является обратной связью САР температурным режимом, начальные установки которого осуществляются оператором.

Выводы

В результате проведенного исследования спроектировано устройство регулируемой подачи СОТС в зону резания сверлильного станка с замкнутой САР температурным режимом. В разработанном устройстве обеспечивается раздельная подача смазывающего и охлаждающего компонентов СОТС. Представленное решение позволяет повысить стойкость инструмента в процессе сверления деталей, а также вести обработку на технологических операциях, где охлаждение падающей струей не может быть реализовано.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2700223 Российская Федерация, МПК В23В1/00, В23Q11/10 Способ подачи смазочно-охлаждающих технологических средств / А. А. Яковлев, С. В. Шостенко, А. М. Макаров, Ю. А. Орлова, С. Г. Поступаева, С. Н. Бо-

риско, Е. И. Сутулов ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2019.

2. Яковлев, А. А. Разработка множеств технических решений установок для преобразования энергии : монография / А. А. Яковлев. – М., 2007. – 127 с.

3. Савин, М. М. Теория автоматического управления : учеб. пособие для вузов / М. М. Савин, В. С. Елсуков, О. Н. Пятина ; под ред. В. И. Лачина. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. – 469 с.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025
The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025.

УДК 66.048.3.069.835

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-102-106

Научная статья
Original article

Н. А. Прохоренко, А. Б. Голованчиков, Ф. А. Бессонов

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТАРЕЛЬЧАТОЙ
РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ С КОРРЕЛИРУЮЩИМИ
ТУННЕЛЬНЫМИ S-ОБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Наталья Андреевна Прохоренко, natasha292009@yandex.ru

Аннотация. Современные тенденции в области проектирования массообменных колонн требуют не только оптимизации существующих решений, но и внедрения инновационных технологий, которые обеспечивают повышение их эффективности. Модернизируемые устройства способны значительно увеличить площадь рабочей поверхности, тем самым обеспечивать лучшее распределение фаз и эффективное взаимодействие между ними (газ-жидкость, пар-жидкость). Одним из перспективных направлений является использование в массообменных колоннах контактных устройств в виде туннельных S-образных элементов, которые не только увеличивают площадь контакта, но также способствуют созданию динамичного потока, позволяющего минимизировать застойные зоны. Также данная модернизация снижает энергозатраты и повышает общую производительность колонны. Численное моделирование и внедрение автоматизации позволит детально изучить поведение жидкой и паровой фаз, а также выявить оптимальные параметры работы для достижения максимальной эффективности массообменных колонн.

Ключевые слова: ректификация, ректификационная колонна, контактные устройства, энергозатраты, ситчатые тарелки

Для цитирования: Прохоренко Н. А., Голованчиков А. Б., Бессонов Ф. А. Разработка автоматизированной тарельчатой ректификационной колонны с коррелирующими туннельными S-образными элементами. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 102–106. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-102-106

Информация об авторах:

Наталья Андреевна Прохоренко – старший преподаватель, канд. техн. наук, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-5706-1475

e-mail: natasha292009@yandex.ru

Александр Борисович Голованчиков – профессор, д-р техн. наук, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0002-4576-4229

e-mail: 29275170082@mail.ru

Федор Алексеевич Бессонов – студент, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ВолгГТУ

e-mail: pahp@vstu.ru

Вклад авторов:

Н. А. Прохоренко – проведение расчетов, участие в обсуждении результатов, написание текста статьи.

А. Б. Голованчиков – определение цели работы, разработка конструкции контактного устройства.

Ф. А. Бессонов – проведение расчетов, построение графиков зависимости расчетных показателей.

N. A. Prokhorenko, A. B. Golovanchikov, F. A. Bessonov

**DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED PLATE DISTILLATION COLUMN
WITH CORRELATED TUNNEL S-SHAPED ELEMENTS**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Natalia A. Prokhorenko, natasha292009@yandex.ru

Abstract. Modern trends in the design of mass-transfer columns require not only the optimization of existing solutions, but also the implementation of innovative technologies that increase their efficiency. The modernized devices are able to significantly increase the working surface area, thereby ensuring better phase distribution and effective interaction between them (gas-liquid, vapor-liquid). One of the promising areas is the use of contact devices in the form of tunnel S-shaped elements in mass-transfer columns, which not only increase the contact area, but also contribute to the creation of a dynamic flow that minimizes stagnant zones. This modernization also reduces energy costs and increases the overall performance of the column. Numerical modeling and the implementation of automation will allow a detailed study of the behavior of the liquid and vapor phases, as well as identify optimal operating parameters to achieve maximum efficiency of mass-transfer columns.

Keywords: rectification, rectification column, contact devices, energy costs, sieve plate

For citation: Prokhorenko N. A., Golovanchikov A. B., Bessonov F. A. Development of an automated plate distillation column with correlated tunnel S-shaped elements. *Izvestiya VSTU*, 2026, 1(308): 102–106. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-102-106

Information about the authors:

Natalia A. Prokhorenko – Senior lecturer, Candidate of Technical Sciences, Department of Processes and apparatus of chemical and food production department, VSTU

orcid.org/0000-0002-5706-1475

e-mail: natasha292009@yandex.ru

Alexander B. Golovanchikov – Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Processes and apparatus of chemical and food production department, VSTU

orcid.org/0000-0002-4576-4229

e-mail: a.b.golovanchikov@mail.ru

Fedor A. Bessonov – Student, Department of Processes and apparatus of chemical and food production department, VSTU

E-mail: pahp@vstu.ru

Contribution of the authors:

Natalia A. Prokhorenko – carrying out calculations, participating in the discussion of results, writing the text of the article.

Alexander B. Golovanchikov – defining the purpose of the work, developing the design of the contact device.

Fedor A. Bessonov – carrying out calculations, constructing graphs of the dependence of calculated indicators.

Введение

В настоящее время существует большое количество работ по модернизации существующих технологий контактирования паровой (газовой) и жидкой фаз в промышленных массообменных колоннах, основной целью которых является разработка экономически выгодных конструкций, работающих с высокой производительностью. В данной работе рассматриваются вопросы автоматизированного моделирования работы ректификационной колонны с ситчатыми тарелками, которые могут найти применение в химической, нефтегазовой и фармацевтической и пищевой промышленности [1–2].

Целью данной работы является автоматизированное моделирование процесса ректификации в массообменной колонне, с высокой площадью поверхности контакта фаз между стекающей жидкостью и поднимающимся вверх паром (газом), для обеспечения наибольшей скорости тепло- и массопереноса на тарелке.

**Материалы и методы
исследования**

На рисунке 1 представлена разработанная колонна для контактирования газа (пара) с жидкостью [3], которая оснащена элементами, способствующими улучшению распределения потоков и минимизации гидравлических потерь.

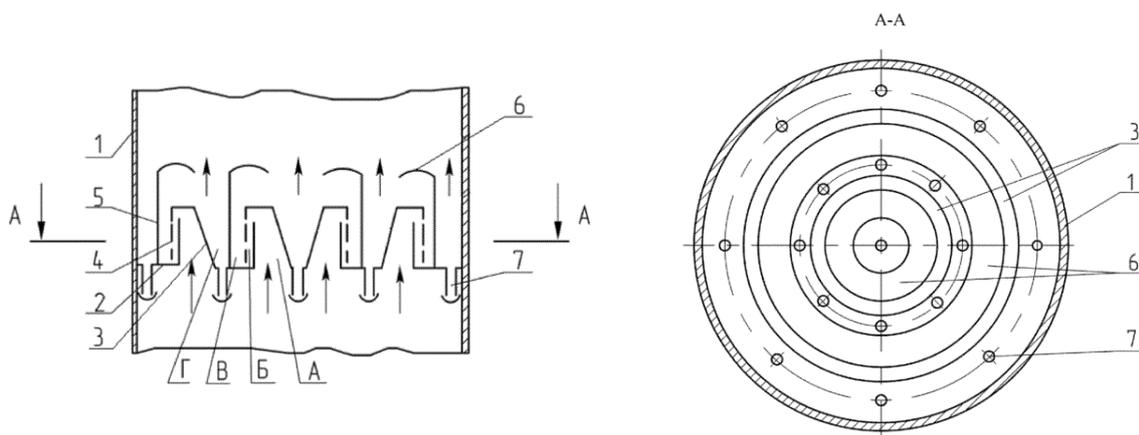


Рис. 1. Общий вид в разрезе колонны для контактирования газа (пара) с жидкостью:
1 – корпус; 2 – тарелки; 3 – глухая стенка; 4 – перфорированная стенка; 5 – вертикальные перегородки;
6 – отбойный козырек; 7 – переливные устройства [3]

Главной конструктивной особенностью разработанной коррелирующей массообменной колонны, является наличие S-образных элементов с переливными устройствами по всему сечению тарелки. Окружностей, образованных S-образными элементами, может быть несколько на тарелке, при этом они расположены осесимметрично с одинаковым зазором между смежными окружностями, которые могут коррелироваться под определенные бинарные смеси. S-образные элементы и вертикальные перегородки 5 с помощью специальных пластин соединяются между собой и образуют полотно тарелки 2. При этом исключается необходимость в каркасе для крепления элементов тарелки 2. Газовая (паровая) фаза проходит по каналам А, образованным глухой стенкой 3 и перфорированной вертикальной стенкой 4, установленные по окружности. После прохождения канала А, газ (пар) попадает в канал Б, образованный перфорированными вертикальными стенками 4 S-образных элементов, установленные по окружности. После чего газ (пар) попадает в жидкость, находящуюся в каналах В, образующихся между перфорированной вертикальной стенкой 4 и вертикальными перегородками 5, установленные по окружности. Образованная газ(пар) -жидкостная эмульсия (пена), отбрасывается отбойными козырьками 6 к переливному устройству 7 в канал Г. За счет установки коррелированных S-образных элементов, возможно изменять расстояние между вертикальной перегородкой 5 и глухой стенкой 3, тем самым изменять коэффициент массопередачи [4].

Проведем расчет разработанной тарельчатой ректификационной колонны с ситчатыми S-

образными тарелками. В качестве исследуемой бинарной смеси возьмем азеотропную «этиловый спирт – вода». Колонна работает при давлении 1,033 атм, с производительностью по исходному раствору 1000 кг/ч. Исходная смесь подающиеся в колонну на тарелку питания: этиловый спирт – вода, со следующими массовыми концентрациями легколетучего компонента:

исходная смесь:

$$\bar{x}_F = 0,24 \kappa_2 A / \kappa_2 (A + B);$$

дистиллят: $\bar{x}_D = 0,87 \kappa_2 A / \kappa_2 (A + B);$

кубовый раствор: $\bar{x}_k = 0,016 \kappa_2 A / \kappa_2 (A + B);$

азеотропный раствор

$$\bar{x}_z = 0,956 \kappa_2 A / \kappa_2 (A + B).$$

Основные расчетные параметры и полученные геометрические размеры колонны из проведенного технологического расчета ректификационной колонны с ситчатыми тарелками отражены в таблице.

Результаты исследования и их обсуждение

Для сравнения был проведен расчет ректификационной колонны такого же диаметра $d = 400$ мм, и производительностью $G_F = 1000$ кг/ч, в качестве контактного элемента выбрана типовая ситчатая тарелка типа ТС (ОСТ 26-805-73). В результате проведенных сравнительных расчетов известной стандартной ситчатой тарелкой типа ТС с разработанной S-образной тарелкой, было установлено что число теоретических тарелок уменьшается: в укрепляющей части с 8 до 6 тарелок, а в исчерпывающей части с 4 до 3 тарелок (рис. 2). Аналогичные изменения показаны и по расчету числа единиц переноса.

Расчетные параметры ректификационной колонны

Наименование параметра	Величина
Средние температуры, °С	
В укрепляющей части колонны	80,5
В исчерпывающей части колонны	86
В колонне	83,25
Абсолютные мольные концентрации, $\text{кмоль}A / \text{кмоль}(A + B)$	
Исходной смеси	0,11
Кубовый остаток	0,01
Дистиллят	0,73
Флегмовое число	1,28
Диаметр колонны, м	0,4
Скорость пара в колонне, м/с	1,01
Тепловая мощность колонны, кВт	4
Число тарелок, шт	11 (6 – укрепл., 3 – исчерп.)
Общая высота колонны, м	3,4
Полное гидравлическое сопротивление ректификационной колонны, Па	3577

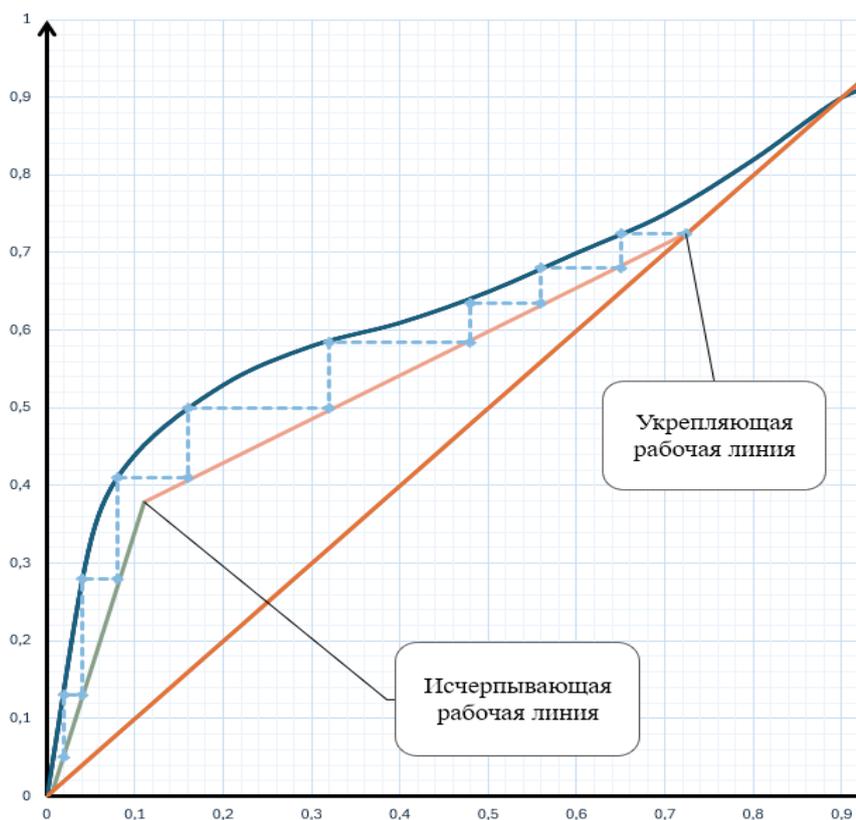


Рис. 2. Построение ступеней изменений концентраций разработанной конструкции ректификационной колонны с S-образными тарелками

Для повышения качества разделения бинарной смеси в массообменных колоннах вводят корректирующие контуры (рис. 3).

Полученная флегма после дефлегматора, возвращается обратно на орошение в колонну

проводит трехконтурную систему регулирования. Датчик регулятора состава QRC дает сигнал коррекции на датчик регулятора температуры TRC, который корректирует сигнал регулятору расхода FRC.

Выводы

Результаты численного моделирования подтверждают целесообразность применения S-образных элементов в конструкциях колонн для контактирования. Повышение площади поверхности контакта фаз не только способствует улучшению тепло- и массопереноса, но и оптимизирует параметры работы всего устройства, повышая его эффективность. Более того, вне-

дрение вертикальной перегородки в конфигурацию колонны создает условия для более равномерного распределения потоков жидкости и пара, что минимизирует образование зон с низкой эффективностью и способствует более стабильной работе массообменной колонны. Это также позволяет снизить риск возникновения неравномерностей (байпасированию, застойные зоны), которые могут негативно сказаться на производительности установки.

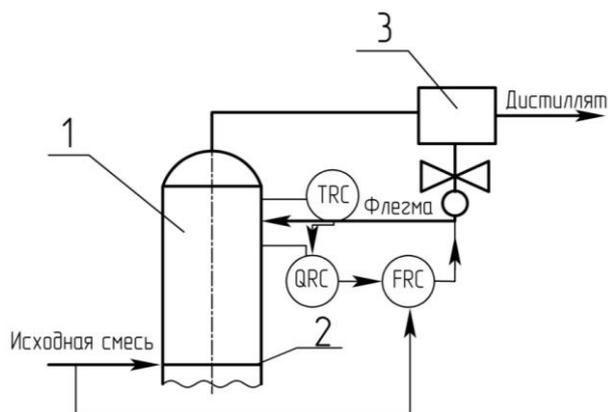


Рис. 3. Трехконтурная система регулирования флегмы с коррекцией по целевому составу:

1 – укрепляющая часть ректификационной колонны;
2 – тарелка питания; 3 – дефлегматор; QRC – регулятор состава;
TRC – регулятор температуры; FRC – регулятор расхода

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 10-е изд. стереотип., доработ. – М. : ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
2. Павленко, А. Н. Автоматизированная система управления распределителем жидкости дистилляционного исследовательского стенда со структурированной насадкой / А. Н. Павленко, В. Е. Жуков [и др.] // Автотметрия. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 19–25.
3. П.м. 201962 Российская Федерация, МПК В01D3/18 Колонна для контактирования газа с жидкостью / Н. А. Прохоренко, А. Б. Голованчиков, Н. В. Шибитова, Р. С. Кочарян ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2021.
4. Голованчиков, А. Б. Разработка и численное моделирование конструкции колонны для контактирования газа с жидкостью / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, С. А. Фоменков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – № 8(4). – С. 11. – DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.002.

Статья поступила в редакцию 20.09.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 20.09.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025.

УДК 621

DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-106-111

Научная статья

Original article

Д. С. Шалухин, Е. А. Дьяченко, А. М. Макаров, Н. В. Тришин

НАЗНАЧЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЯМОГО ОТЖИГА

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Даниил Сергеевич Шалухин, Nisse3012@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке и исследованию системы управления для установки прямого отжига. Рассмотрены ключевые функциональные задачи системы, включая точное поддержание температурного режима, регулирование и управление скоростью подачи воздуха. Особое внимание уделено архитектурным и алгоритмическим особенностям системы, обеспечивающим высокое качество отжига и воспроизводимость результатов.

Ключевые слова: прямой отжиг, DAS, 3D-принтер, адгезия

Для цитирования: Шалухин Д. С., Дьяченко Е. А., Макаров А. М., Тришин Н. В. Назначение и особенности системы управления прямого отжига. Известия ВолгГТУ, 2026, 1(308): 106–111. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-1-308-106-111

© Шалухин Д. С., Дьяченко Е. А., Макаров А. М., Тришин Н. В., 2026.

Информация об авторах:

Даниил Сергеевич Шалухин – магистрант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: Nisse3012@mail.ru

Евгений Александрович Дьяченко – аспирант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: zhenya.dyachenko.1999@gmail.com

Алексей Михайлович Макаров – заведующий кафедрой, канд. техн. наук, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

orcid.org/0000-0001-5617-8738

e-mail: amm34@mail.ru

Никита Валерьевич Тришин – аспирант, кафедра «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: triiish1@icloud.com

Вклад авторов:

Д. С. Шалухин – написание текста статьи, подготовка сопроводительной документации, участие в обсуждении результатов.

Е. А. Дьяченко – создание конструкции устройства, подбор комплектующих, редакция текста, участие в обсуждении результатов.

А. М. Макаров – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

Н. В. Тришин – подготовка сопроводительных документов, формулирование выводов, участие в обсуждении результатов.

D. S. Shalukhin, E. A. Dyachenko, A. M. Makarov, N. V. Trishin

PURPOSE AND FEATURES OF THE DIRECT ANNEALING CONTROL SYSTEM

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Daniil S. Shalukhin, Nisse3012@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the development and research of a control system for a direct annealing unit. The key functional tasks of the system are considered, including precise temperature control, regulation, and control of the air supply rate. Special attention is paid to the architectural and algorithmic features of the system, which ensure high-quality annealing and reproducible results.

Keywords: direct annealing, DAS, 3D printer, adhesion

For citation: Shalukhin D. S., Dyachenko E. A., Makarov A. M., Trishin N. V. Purpose and features of the direct annealing control system. Izvestiya VSTU, 2026, 1(308): 106–111. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-1-308-106-111

Information about the authors:

Daniil S. Shalukhin – Master's student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: Nisse3012@mail.ru

Evgeny A. Dyachenko – graduate student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: zhenya.dyachenko.1999@gmail.com

Alexey M. Makarov – Head of the Department, Candidate of Technical Sciences, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

orcid.org/0000-0001-5617-8738

e-mail: amm34@mail.ru

Nikita V. Trishin – graduate student, Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: triiish1@icloud.com

Contribution of the authors:

Daniil S. Shalukhin – writing the article, preparing supporting documentation, participating in the discussion of the results.

Evgeny A. Dyachenko – creation of the device design, selection of components, editing of the text, participation in the discussion of the results.

Alexey M. Makarov – defining the purpose of the work, participating in the discussion of the results.

Nikita V. Trishin – preparation of accompanying documents, formulation of conclusions, participation in the discussion of results.

Введение

Современное аддитивное производство переживает переход от создания прототипов к изготовлению функциональных деталей и готовых изделий, что сопровождается ужесточением требований к их механическим характеристикам и эксплуатационной надежности. Особую актуальность приобретает задача целенаправленного управления структурой и свойствами материала непосредственно в процессе синтеза, что является ключевым фактором для ответственных применений в аэрокосмической отрасли, машиностроении и медицине.

Перспективным решением данной проблемы является разработка и внедрение систем прямого отжига (Direct Annealing System, DAS), интегрированных в процесс FDM-печати. Данная технология позволяет проводить контролируемую термическую обработку каждого нанесенного слоя в реальном времени, обеспечивая управление фазовыми превращениями, снятие термических напряжений и формирование заданной микроструктуры материала непосредственно в ходе аддитивного построения.

Целью настоящего исследования является разработка комплексной архитектуры, алгоритмического обеспечения и функциональных возможностей системы управления DAS. В работе рассматриваются принципы ее интеграции с оборудованием для FDM-печати.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на лабораторном стенде, включающем:

- модернизированный FDM-принтер с интегрированной системой прямого отжига (DAS) с кинематикой IDEX;
- систему термического воздействия с регулируемой температурой (диапазон 50–400 °С);
- систему контроля и регулирования воздушного потока (0–50 л/мин);
- термокамеру с поддержанием температуры до 250 °С.

Методика исследования заключалась в разработке и тестировании системы прямого отжига расположенного рядом с печатающей головке.

Результаты исследования и их обсуждение

Печатающая головка построена на базе расширительной платы BTT EBB42, которая получает питание 24 В и управляющие сигналы по двум парам проводов (CAN-шина). Все компоненты экструдера должны быть подключены непосредственно к этой плате и управляются через нее. Схема подключения представлена на рис. 1.

Элементы, которые необходимо подключить к плате описаны ниже.

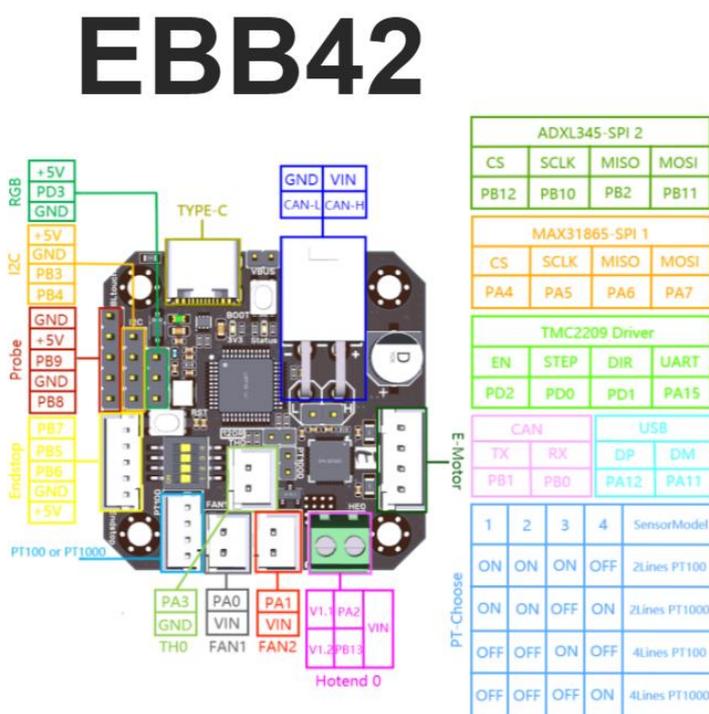


Рис. 1. Схема возможных подключений платы EBB42

Вентилятор 30x30x10 (24V) 2 шт. Один из них необходим для охлаждения расширительной платы. Второй предназначен для охлаждения усилителя тензодатчика и мотора фидера.

Термопара PT100/PT1000. Датчик температуры в нагревательном элементе отжига. Регулируется непосредственно платой экструдера.

Тензодатчик HX711. Необходимо подключить к плате для считывания сетки стола и автокалибровки первого слоя.

Мотор фидера Orbiter Trianglelab V2.0 LDO. Подключение шагового двигателя непосредственно к плате. На плате имеется встроенный драйвер управления мотором.

Нагреватель экструдера Trianglelab 6x20/24V/60W. Высокотемпературный нагревательный картридж.

Термистор T-D500. Высокотемпературный термистор, подключается к плате и измеряет температуру нагревательного блока.

Исходя из перечня элементов, которые нужно подключить, была составлена схема подключения (рис. 2)

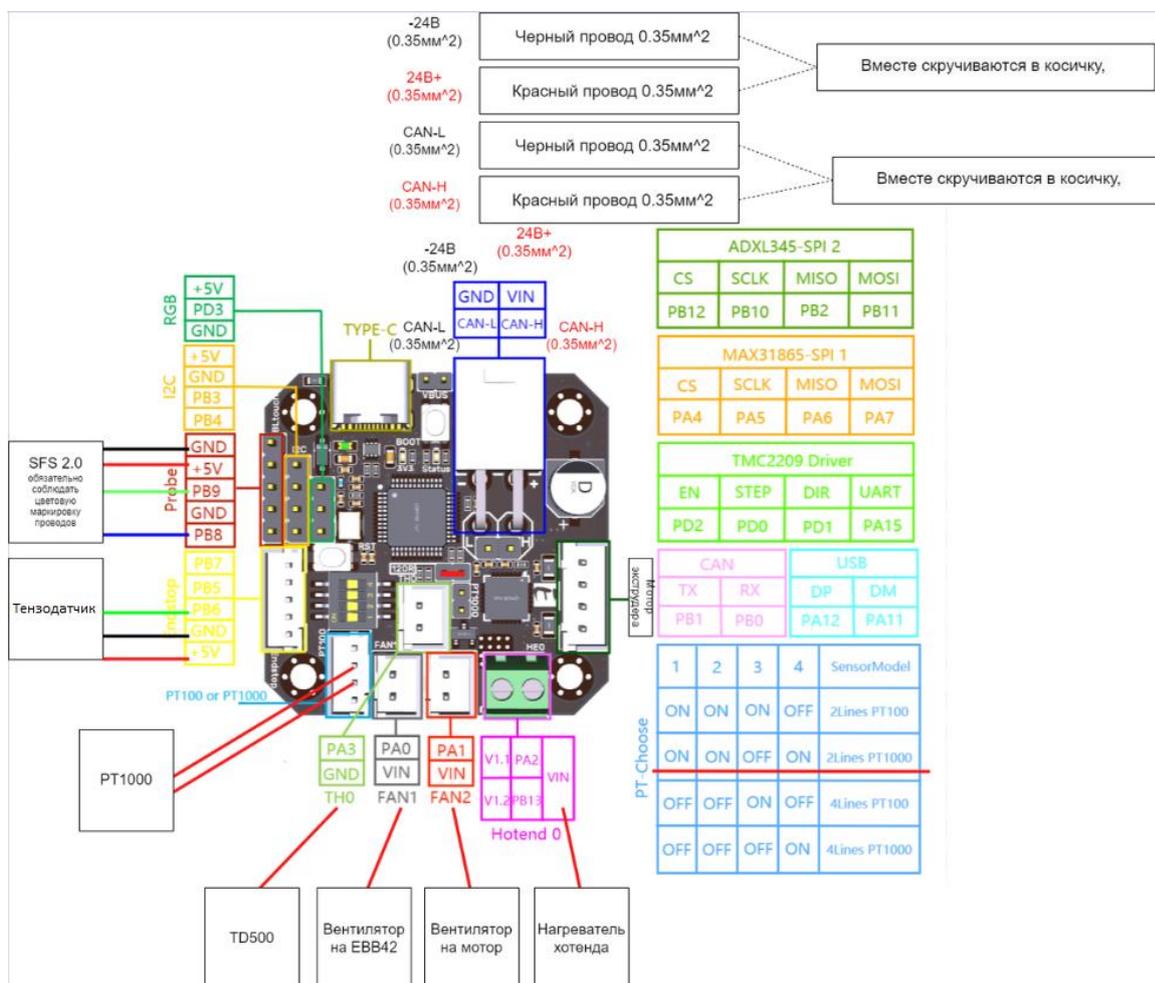


Рис. 2. Схема подключения электронных элементов

Для внедрения системы DAS в 3D-принтер с кинематикой IDEX (две независимые печатающие головки) была составлена схема подключения рис. 3.

Система экструдеров, как видно на схеме подключается параллельно к плате, для независимого управления обеими печатными головками. К каждому экструдеру подводится отдельное питание 24 В, а также провода CAN-

модуля от управляющей платы принтера. Так как турбины обдува отжига — это отдельный блок, к нему необходимо подвести питание и управляющий сигнал отдельно. Турбины имеют собственный драйвер, позволяющий менять обороты двигателя в процентном соотношении от максимальной мощности. Нагреватель отжига подключен к сети 220 В через твердотельное реле, управляемое платой принтера.

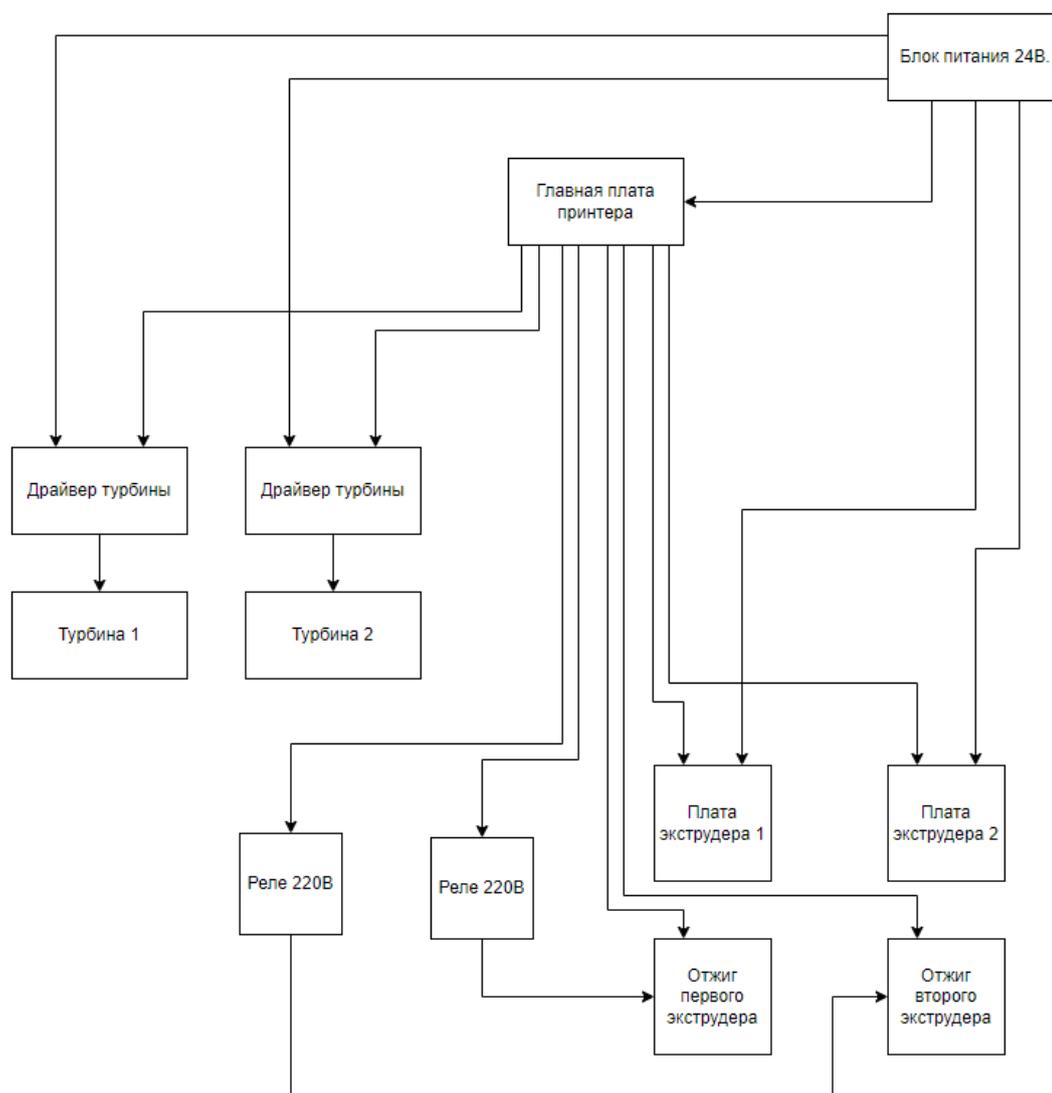


Рис. 3. Схема подключения системы прямого отжига в 3D-принтере

Для получения качественного результата, печать любым филаментом требует стабильной температуры. Для этого в 3D-принтерах используется PID регулятор на нагревательных элементах.

В разработанной системе было необходимо обеспечить стабильную температуру нагревателя отжига. Реализовано это в программном обеспечении с помощью макроса. Принтер автоматически делает определенный алгоритм, в ходе которого проводит 5 циклов нагрева

и остывания. После этого компьютер платы вычисляет 3 коэффициента, которые будут сглаживать нагрев и поддержание температуры при последующих печатях.

Чтобы PID регулятор нагревателя отжига правильно работал, алгоритм, который описан выше, необходимо запускать в максимально приближенных к печати условиях.

Ниже представлен макрос Klipper, который позволяет автоматически проводить подбор коэффициентов PID экструдера.

```

[gcodes_macro PID_EXTRUDER1]
description: Макрос для калибровки ПИД Экструдера
gcode:
  {% set travel_speed = printer.toolhead.max_velocity|int %}
  {% set x_center = (printer.toolhead.axis_minimum.x|float + printer.toolhead.axis_maximum.x|float) / 2 %}
  {% set y_center = (printer.toolhead.axis_minimum.y|float + printer.toolhead.axis_maximum.y|float) / 2 %}
  {% if "xyz" not in printer.toolhead.homed_axes %}

```

```
G28
{% else %}
G28 Z
{% endif %}
G90
G1 X{x_center} Y{y_center} F{printer.configfile.settings.printer.max_velocity*60*0.7}
G1 Z5 F{printer.configfile.settings.printer.max_z_velocity*60}
SET_FAN_SPEED FAN=extruder_fan SPEED=0.7
{% set TARGET_TEMP = params.TARGET_TEMP|default(200)|float %}
PID_CALIBRATE HEATER=extruder TARGET={TARGET_TEMP}
M118 Калибровка PID первого экструдера завершена
TURN_OFF_HEATERS
SAVE_CONFIG
```

Выводы

Установлено, что система обеспечивает воспроизводимый контроль микроструктуры полимерных материалов непосредственно в процессе FDM-печати, что позволяет целенаправленно формировать механические и эксплуатационные характеристики изделий.

Перспективы дальнейших исследований:

- внедрение алгоритмов машинного обучения для автоматической оптимизации термических профилей в реальном времени;
- создание открытых API-интерфейсов системы DAS.

Реализация указанных направлений позволит создать новое поколение интеллектуальных

аддитивных систем, способных обеспечивать программируемые свойства изделий на уровне микроструктуры материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование влияния термостатирования рабочей области на механические свойства изделий, получаемых методом послойного наплавления / М. Ю. Козенко, А. М. Макаров, Е. А. Дьяченко, О. И. Сушкова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 73–76.
2. EBB42 datasheet [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://github.com/bigtreetech/EBB> (дата обращения: 19.11.2025)
3. Klipper – программное обеспечение [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://klipper.wiki/> (дата обращения: 19.11.2025).

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 10.12.2025, подписана в печать 15.12.2025

The article was submitted 01.12.2025, revised 10.12.2025, accepted for publication 15.12.2025.

Ответственный за выпуск Ольга Александровна **МАКАРОВА**

Оригинал-макет и электронная версия издания
подготовлены редакционно-издательским отделом
Издательства ВолГТУ

Корректура **Н. Н. Кваши**
Компьютерная верстка: **Е. В. Макарова**

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: ianovakov@vstu.ru

Темплан 2026 г. Поз. № 1ж. Дата выхода в свет 29.01.2026 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 1
3,15. Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 13.

Отпечатано в типографии Издательства ВолГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

ISSN 1990-5297



9 771990 529000 >