

Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

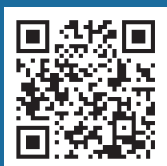
Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University

<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

2025

Том
VOLUME 4

Выпуск
ISSUE 1



ТРУДЫ Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

ISSN 2414-1437 (Print)

16+

Том 4 | Выпуск 1 | 2025
Сквозной номер (13)

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с 2017 года

<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет
Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д. 3

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных тех-
нологий и массовых коммуникаций, свидетельство
о регистрации СМИ ПИ № ФС77-70733
от 15 августа 2017 г.

Рекомендован ВАК

Индексация

РИНЦ
Crossref
Lens
OpenAlex
Scilit
Google Scholar

ОТКРЫТЫЙ ДОСТУП

Статьи журнала распространяются в сети Интернет
на условиях немедленного открытого доступа
с лицензией CC BY 4.0

ПОДПИСКА

Оформить подписку на печатную версию
можно на сайте журнала:
<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

РЕДАКЦИЯ

Адрес: 190121, Санкт-Петербург,
ул. Лощманская, д. 3
Тел. +7(812)714-06-44,
e-mail: journal@smtu.ru

Оригинал-макет изготовлен ООО «Эко-Вектор»,
Выпускающий редактор Н.Н. Репьева
Корректор И.В. Смирнова
Верстка А.Г. Хуторовская

Формат 60 × 84/8. Усл.-печ. л. 16,04.
Тираж 500 экз. Цена свободная.
Отпечатано в ООО «Типография Экспресс В2В».
191180, Санкт-Петербург, наб. Реки Фонтанки,
д. 104, лит. А, пом. 3Н, оф. 1. Тел.: +7(812)646-33-77.
Заказ № 5-3217-lv. Подписано в печать 26.03.2025.
Выход в свет 31.03.2025

Главный редактор

Денис Иванович Кузнецов — доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе СПбГМТУ, заведующий кафедрой проектирования и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов, (Санкт-Петербург, Россия)

Ответственные секретари:

Владимир Олегович Кожемякин — канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Россия)

Никита Владимирович Тряскин — канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ORCID: 0000-0002-2208-2241 (Санкт-Петербург, Россия)

Александра Дмитриевна Егорова — Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Россия)

Редакционный совет:

Глеб Андреевич Турчин (председатель) — д-р техн. наук, профессор, ректор СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Денис Иванович Кузнецов — д-р техн. наук, доцент, проректор по научной работе СПбГМТУ, заведующий кафедрой проектирования и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов, eLibrary SPIN: 5128-0266 (Санкт-Петербург, Россия)

Алексей Евгеньевич Васильев — д-р техн. наук, доцент, декан факультета корабельной энергетики и автоматики, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Вячеслав Анатольевич Дюк — д-р техн. наук, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Антон Александрович Жиленков — канд. техн. наук, доцент, декан факультета цифровых промышленных технологий, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Сергей Александрович Исаев — д-р физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. главного маршала авиации А.А. Новикова (Санкт-Петербург, Россия)

Лу Яньчжо — PhD, Харбинский инженерный университет (Харбин, Китай)

Александр Александрович Равин — д-р техн. наук, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Виталий Владимирович Сергеев — д-р техн. наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

Сяу Гун — PhD, Чжэцзянский океанический университет (Ханчжоу, Китай)

Сюэ Яньчжо — PhD, Харбинский инженерный университет (Харбин, Китай)

Олег Яковлевич Тимофеев — д-р техн. наук, профессор кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Алексей Юрьевич Яковлев — д-р техн. наук, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Редакционная коллегия:

Сергей Владимирович Вербицкий — канд. техн. наук, заведующий кафедрой океанотехники и морских технологий, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Максим Валерьевич Власьев — канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования судов, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Сергей Яковлевич Галушин — канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией информационных компьютерных систем, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Ангела Алексеевна Грибанькова — д-р пед. наук, начальник управления организации научной работы, заведующий кафедрой химии, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Марина Александровна Максимова — канд. техн. наук, доцент кафедры судовой автоматики и измерений, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Олег Николаевич Петров — канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Василий Михайлович Рычков — канд. воен. наук, декан факультета морского приборостроения, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Александр Иванович Сетин — д-р тех. наук, заведующий кафедрой морских информационных систем и технологий, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Алексей Петрович Сеньков — д-р тех. наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Юрий Леонардович Сиек — д-р тех. наук, заведующий кафедрой систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Алексей Вячеславович Солодко — канд. воен. наук, доцент кафедры проектирования и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Никита Владимирович Тряскин — канд. техн. наук, декан факультета кораблестроения и океанотехники, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Георгий Владимирович Черкаев — канд. техн. наук, заведующий кафедрой судовых энергетических установок, систем и оборудования, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)



Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов. Точка зрения авторов может не совпадать с мнением редакции. К публикации принимаются статьи, подготовленные только в соответствии с правилами для авторов. Направляя статью в редакцию, авторы принимают условия договора публичной оферты. С правилами для авторов и договором публичной оферты можно ознакомиться на сайте <https://journals.eco-vector.com/2414-1437>. Полное или частичное воспроизведение материалов, опубликованных в журнале, допускается только с разрешения издателя и редакции, ссылка на журнал обязательна.

TRANSACTIONS of the Saint Petersburg State Marine Technical University

ISSN 2414-1437 (Print)

Volume 4 | Issue 1 | 2025



QUARTERLY PEER-REVIEWED ACADEMIC JOURNAL

<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

FOUNDER AND PUBLISHER

Saint Petersburg State Marine Technical University
Address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg,
190121, Russia

Registered by the Federal Service for Supervision of
Communications, Information Technology and Mass
Media Registration number: ПИ No. ФС 77-70733
as of August 15, 2017.

INDEXATION

Russian Science Electronic Library (eLibrary.ru)
Crossref
Lens
Openalex
Scilite
Google Scholar

EDITORIAL CONTACT

Address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg,
190121, Russia
E-mail: journal@smtu.ru
Phone: +7(812)714-06-44

SUBSCRIPTION

Subscription to the electronic version:
<https://journals.eco-vector.com>
<https://elibrary.ru>

OPEN ACCESS

Articles freely available online with
CC BY 4.0 license

SUBSCRIPTION

To subscribe to the print issues follow:
<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

Editor-in-Chief

Denis I. Kuznetsov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department of Design and Production Technology of Marine Underwater Vehicles and Robots, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Executive Secretaries

Vladimir O. Kozhemyakin — Candidate of Technical Sciences, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Nikita V. Tryaskin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Marine Technical University, ORCID: 0000-0002-2208-2241 (Saint Petersburg, Russia)

Alexandra D. Egorova — Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Editorial Board

Gleb A. Turichin (Chairman) — Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Denis I. Kuznetsov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department of Design and Production Technology of Marine Underwater Vehicles and Robots, Saint Petersburg State Marine Technical University, eLibrary SPIN: 5128-0266 (Saint Petersburg, Russia)

Alexey E. Vasiliev — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Ship Power Engineering and Automation, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Vyacheslav A. Dyuk — Doctor of Technical Sciences, N.S. Solomenko Institute of Transport Problems, Russian Academy of Sciences (Saint Petersburg, Russia)

Anton A. Zhilenkov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Digital Industrial Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Sergey A. Isaev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov (Saint Petersburg, Russia)

Lu Yanzho — PhD, Harbin Engineering University (Harbin, China)

Alexander A. Ravin — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Ship Automation and Measurements, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Vitaly V. Sergeev — Doctor of Technical Sciences, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russia)

Siwu Gong — PhD, Zhejiang Ocean University (Hangzhou, China)

Xue Yanzho — PhD, Harbin Engineering University (Harbin, China)

Oleg Ya. Timofeev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Ship Design and Technical Operation, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Alexey Yu. Yakovlev — Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Hydroaeromechanics and Marine Acoustics, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Editorial Council

Sergey V. Verbitsky — Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Ocean Engineering and Marine Technology, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Maksim V. Vlasov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ship Design Department, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Sergey Ya. Galushin — Candidate of Technical Sciences, Head of Research Laboratory of Information Computer Systems, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Angela A. Gribankova — Doctor of Pedagogical Sciences, Head of Scientific Work Organisation Department, Head of Chemistry Department, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Marina A. Maksimova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Ship Automation and Measurements, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Oleg N. Petrov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Science and Information Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Vasily M. Rychkov — Candidate of Military Sciences, Dean of the Faculty of Marine Instrumentation, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Alexander I. Setin — Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Marine Information Systems and Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Alexey P. Senkov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Yuri L. Siek — Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Automatic Control Systems and On-Board Computer Engineering, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Alexey V. Solodko — Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Department of Design and Production Technology of Marine Underwater Vehicles and Robots, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Nikita V. Tryaskin — Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Shipbuilding and Ocean Engineering, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

Georgiy V. Cherkaev — Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Ship Power Plants, Systems and Equipment, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)



The editors are not responsible for the content of advertising materials. The point of view of the authors may not coincide with the opinion of the editors. Only articles prepared in accordance with the guidelines are accepted for publication. By sending the article to the editor, the authors accept the terms of the public offer agreement. The guidelines for authors and the public offer agreement can be found on the website: <https://journals.eco-vector.com/2414-1437>. Permissions to reproduce material must be obtained from the publisher and retained in order to confirm the legality of using reproduced materials.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Экспериментальное определение центра кручения открытых тонкостенных профилей	5
<i>А.Н. Андреев, Д.А. Николаев</i>	
Апробация вибродиагностического метода для обнаружения дефектов крепления при ослаблении натяжения крепежного элемента	15
<i>И.В. Буковский, О.В. Хруцкий</i>	
Аналитический обзор распределителей четырехходовых для управления дистанционно-управляемыми клапанами на подводной лодке	23
<i>В.Ш. Вахитов</i>	
Проектирование современной 3D-технологии нарезания качественной резьбы в изделиях судостроительного производства	33
<i>А.З. Курбанов, Н.М. Вагабов</i>	
Расчетное исследование эффективного винтового конденсатора пара	43
<i>О.О. Лебедев</i>	
Анализ потерь трудоемкости после корректировки эксплуатационной документации на строящемся заказе	51
<i>М.Д. Мовчанова, А.С. Недорезанюк, В.В. Трусов, А.Б. Фомичев</i>	
Исследование системы управления движением безэкипажного катера	61
<i>Е.Р. Филиппова, Ю.В. Ясинская</i>	

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Анализ применения комплексной математической модели к проектированию ЯЭУ с ЖМТ	69
<i>А.А. Горбачев, А.А. Иванов</i>	
Обнаружение случайного сигнала на фоне негауссовской помехи при наличии обучающих неидеальных помеховых выборок	75
<i>Е.К. Самаров</i>	
Влияние аддитивных помех и фазовых флуктуаций на характеристики синтезированной апертурной антенны при произвольной траектории движения летательного аппарата	81
<i>Е.К. Самаров, И.В. Евграфова</i>	

СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Применимость САМ-систем в области аддитивных технологий на примере работы с электродуговым выращиванием и СПРУТКАМ	89
<i>И.Д. Бородкин, З.И. Гимранов, М.А. Олейник, В.Г. Смелов</i>	
Порошковая лазерная наплавка как элемент системы машиностроения индустрии 4.0	97
<i>А.А. Вознесенская, Р.В. Чкалов, А.В. Киреев, А.С. Разносчиков, Д.А. Кочуев</i>	
Исследование структуры, фазового состава и механических свойств аддитивно выращенного композита на основе Ti-6Al-4V/V ₂ C с использованием синхротронного излучения	107
<i>И.С. Герцель, К.Э. Купер</i>	
Диффузионно-кинетическая модель образования и роста интерметаллидной фазы в трехкомпонентных твердых растворах на базе никеля с учетом температурной зависимости коэффициента диффузии	115
<i>Е.К. Коваленко, Е.А. Валдайцева, Г.А. Туричин</i>	
Влияние стратегии наплавки слоя на формирование, структуру и свойства толстостенных элементов при электродуговом выращивании деталей из алюминиевого сплава ER5356	123
<i>К.С. Насоновский, А.А. Воропаев, Д.В. Волосевич, Н.Д. Роцин, Р.С. Корсмик</i>	

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

Shear center determination of open light-gauge sections	5
<i>A.N. Andreev, D.A. Nikolaev</i>	
Testing vibration diagnostic method to detect fastening defects due to slackening	15
<i>I.V. Bukovsky, O.V. Khrutsky</i>	
Analytical review of four-way directional valves used to control remote-controlled submarine valves	23
<i>V.Sh. Vakhitov</i>	
Design of state-of-the-art 3D technology used to cut high-quality threads in shipbuilding products	33
<i>A.Z. Kurbanov, N.M. Vagabov</i>	
Calculation study of an efficient screw-type steam condenser	43
<i>O.O. Lebedev</i>	
Analysis of labor intensity losses upon amendments to operational documentation for a construction project	51
<i>M.D. Movchanova, A.S. Nedorezanyuk, V.V. Trusov, A.B. Fomichev</i>	
Study of motion control system of unmanned boat	61
<i>E.R. Filippova, Yu.V. Yasinskaya</i>	

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

Analysis of using complex mathematical models to design nuclear power plants with liquid metal coolant	69
<i>A.A. Gorbachev, A.A. Ivanov</i>	
Detection of a random signal in non-Gaussian noise with non-ideal training interference samples	75
<i>E.K. Samarov</i>	
How additive interference and phase fluctuations influence the performance of a synthetic aperture antenna on an arbitrary aircraft path	81
<i>E.K. Samarov, I.V. Evgrafova</i>	

WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES

CAM system applications in additive technologies as shown by wire and arc additive manufacturing and SPRUTCAM	89
<i>I.D. Borodkin, Z.I. Gimranov, M.A. Oleinik, V.G. Smelov</i>	
Powder laser cladding as a component of Industry 4.0 machine building systems	97
<i>A.A. Voznesenskaya, R.V. Chkalov, A.V. Kireev, A.S. Raznoschikov, D.A. Kochuev</i>	
Study of the structure, phase composition, and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V/B ₄ C composite using synchrotron X-ray	107
<i>I.S. Gertsel, K.E. Kuper</i>	
Diffusion-kinetic model of intermetallic phase development and growth in three-component Ni-based solid solutions based on diffusion coefficient temperature dependence	115
<i>E.K. Kovalenko, E.A. Valdaytseva, G.A. Turichin</i>	
The effect of the layer deposition technique on production, structure, and properties of thick-walled elements during wire and arc additive manufacturing of parts from aluminum alloy ER5356	123
<i>K.S. Nasonovskiy, A.A. Voropaev, D.V. Volosevich, N.D. Roschin, R.S. Korsmik</i>	

УДК 629.12:539.433

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_5

Оригинальное исследование

Экспериментальное определение центра кручения открытых тонкостенных профилей

А.Н. Андреев, Д.А. Николаев

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В отечественном машиностроении вопросы импортозамещения весьма актуальны. В последнее время при оптимизации конструктивно-технологических параметров элементов энергетических машин получили тонкостенные криволинейные поперечные сечения. Методика расчета прочностных характеристик для тонкостенного замкнутого профиля аналогична общераспространенным для расчета массивных профилей, однако для расчета сечений с незамкнутыми тонкостенными криволинейными профилями она ограничено применима, ввиду несовпадения центра кручения с центром масс площади сечения.

Цель — представить некоторые особенности деформированного состояния узлов и деталей различных энергетических машин и механизмов, имеющих незамкнутые тонкостенные криволинейные профили, работающих при различных видах деформации.

Методы. Описана методика разработанного универсального алгоритма для автоматизированного расчета основных жесткостных характеристик деформируемых открытых тонкостенных криволинейных профилей с определением центра изгиба-кручения. Рассмотрены варианты определения этих характеристик для прямолинейных тонкостенных и сложных тонкостенных криволинейных сечений элементов.

Результаты. Разработанная экспериментальная установка позволяет определять положение силовых плоскостей, линия пересечения которых задает положение центра изгиба, описана методика проведения экспериментов. Представлены экспериментальные данные по определению центра изгиба для произвольного открытого тонкостенного профиля, по которым построены графические зависимости влияния положения силовой плоскости и отклонения положения поперечного сечения от вертикального. Высокое совпадение теоретических и экспериментальных данных указывает на надежность разработанного алгоритма и программного обеспечения.

Выводы. На основании сопоставления расчетных теоретических координат с экспериментальными данными сделан вывод о высокой точности расчета разработанной электронной программы. Разработанная программа — не только эффективный инструмент для проектирования и расчета, но и может быть полезной для научных исследований, связанных с конструированием элементов машин и оборудования.

Ключевые слова: тонкостенный криволинейный профиль; центр изгиба; прочность; жесткость; кручение; сечение; деформация.

Как цитировать

Андреев А.Н., Николаев Д.А. Экспериментальное определение центра кручения открытых тонкостенных профилей // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 5–14. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_5

Original study article

Shear center determination of open light-gauge sections

Alexander N. Andreev, Dmitriy A. Nikolaev

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Import substitution issues are very topical in the domestic machine building industry. Recently, thin-walled curvilinear cross-sections have been obtained in the optimization of design and technological parameters thin-walled curvilinear cross-sections have been recently emphasized in the optimization of structural and technological parameters of power machine elements. The method of calculation of strength characteristics for a thin-walled closed profile is similar to those commonly used for the calculation of solid profiles, but for the calculation of sections with unclosed thin-walled curvilinear profiles it is limitedly applicable, due to the mismatch of the center of torsion with the center of mass of the section area.

AIM: To presents some highlights on the strain state of units and parts of various power machines and devices with curved light-gauge open profiles operating in various strain conditions.

METHODS: It describes the methodology of the proposed general algorithm for the automated calculation of the basic stiffness parameters of strained curved light-gauge open profiles with the determination of the shear center. It also reviews different options for determining these parameters for light-gauge line profiles and complex light-gauge profiles of components.

RESULTS: An experimental setup has been developed that allows to identify the planes of loading determining the shear center at their intersection. It shows experimental data on determining the shear center for a random light-gauge open profile. The data is used to develop the loading plane vs variation of the vertical cross section curves. The developed program is not only an effective tool for design and calculation, but also can be useful for scientific research related to the design of machine and equipment elements.

CONCLUSIONS: The author makes a conclusion on the high accuracy of calculations using the developed software by comparing the calculated analytical coordinates with experimental data. The developed program is not only an effective tool for design and calculation, but also can be useful for scientific research related to the design of machine and equipment elements.

Keywords: thin-walled curved profile; shear center; strength; stiffness; torsion; section; strain.

To cite this article

Andreev AN, Nikolaev DA. Shear center determination of open light-gauge sections. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):5–14. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_5

Received: 31.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 25.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

В отечественном машиностроении в последнее время, как известно, вопросы импортозамещения приобретают весьма актуальное значение. Процесс частичной или полной замены существующих зарубежных энергетических машин, узлов, механизмов и деталей на отечественные связан с полным циклом промышленного производства, от конструкторского проекта разработки до непосредственного промышленного изготовления в условиях именно собственного производства. На начальной стадии расчета и проектирования поиск оптимального конструкторского решения всегда является ключевой и первостепенной задачей [1–3]. При оптимизации конструктивно-технологических параметров элементов энергетических машин в последнее время получили тонкостенные криволинейные поперечные сечения, конструкции из которых имеют меньшую массу по сравнению с массивными сечениями, что и является в инженерных расчетах методом оптимального проектирования [4–6]. Методика расчета прочностных характеристик для тонкостенного замкнутого профиля аналогична общераспространенным методикам расчета массивных профилей, однако для расчета сечений с незамкнутыми тонкостенными криволинейными профилями она ограниченно применима, ввиду несовпадения центра кручения с центром масс площади сечения.

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

Фактором, резко снижающим жесткость незамкнутых тонкостенных криволинейных профилей, работающих на изгиб, является появление касательных напряжений в сечениях, приводящих к смене деформации изгиба на изгиб с кручением. Однако тонкостенные незамкнутые профили иначе работают на кручение, поэтому при проектировании конструкции нужно постараться избежать этого явления или контролировать его. Задачей является определение положения плоскости приложения нагрузки, в которой не будет деформации кручения. Теоретически данная плоскость проходит через линию, проведенную через центр кручения-изгиба, поэтому задача переходит в расчет координат этой точки для любого незамкнутого профиля. В любом случае, если не удастся избежать возможного кручения, его учет является качественно необходимым при анализе деформирования конструкции.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

В основу программы встроен модуль конструирования поперечных сечений конструкции. Модуль позволяет создавать массивные многосвязные и замкнутые в «кольцо» или открытые (не имеющие встроенных замкнутых участков) разветвленные тонкостенные профили сечения, как прямолинейного, так и криволинейного очертания. Расчет массивных профилей проводится по рисунку сечения

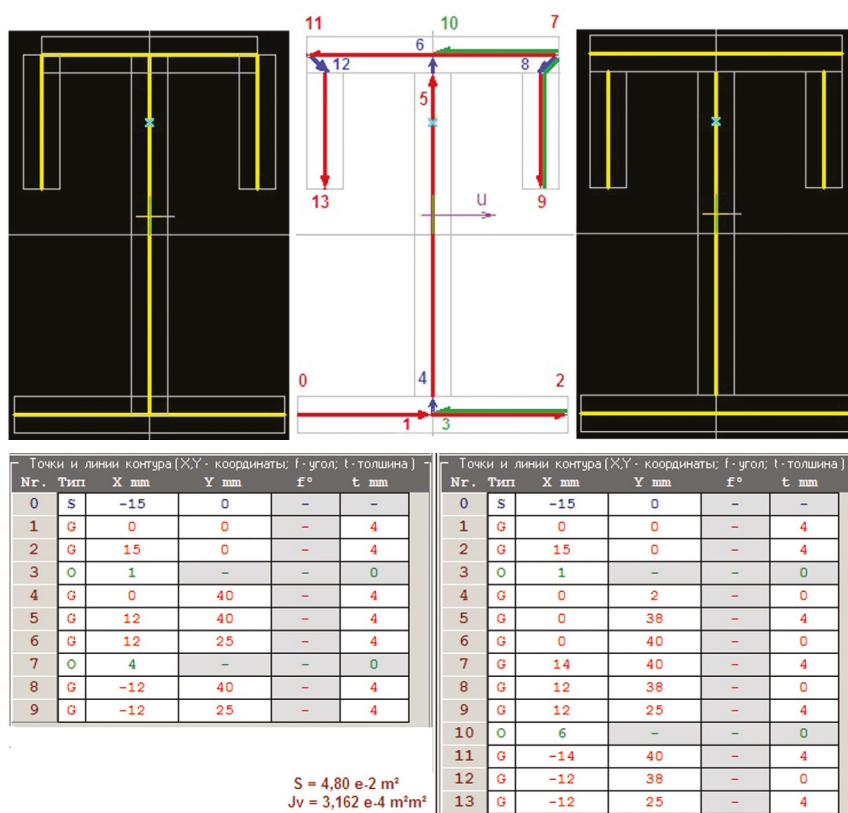


Рис. 1. Построение поперечного сечения профиля.
Fig. 1. Cross-sectioning process.

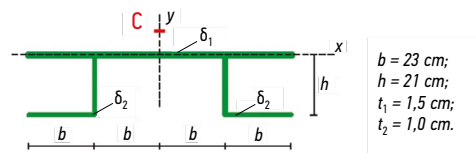
с разрешением 11 пикселей на единицу измерения. Число 11 выбрано в качестве компромисса между временем расчета и его погрешностью, которая составляет, как правило, менее 1 %. Предлагаемая программа предназначена для рисования (конструирования) и расчета основных характеристик массивных и незамкнутых тонкостенных прямолинейных и криволинейных поверхностей сечений.

На рис. 1 показана схема последовательности задания поперечного сечения линиями с разветвленным профилем. Позиции, имеющие тип «0», означают возврат в ранее отмеченную точку. Остальные позиции те же, что при изображении массивного контура с добавлением толщины линии. Для расчета тонкостенных криволинейных профилей использован существующий метод с дополнениями, позволившими автоматизировать расчет разветвленных профилей. Такие профили рассчитываются как одна непрерывная линия, некоторые участки которой могут иметь нулевую толщину, для большей наглядности программа изображает толщину листа. Отрезки нулевой толщины не рисуются, но присутствуют в таблице

участков профиля. Наличие этих элементов позволяет автоматизировать возврат в точку ветвления и избежать двойного учета накладывающихся площадей, что повышает достоверность рассчитанных характеристик.

Главной целью расчета является определение положения центра кручения-изгиба. На рис. 2 представлен расчет тонкостенного прямолинейного профиля. По алгоритму находим центр тяжести площади сечения и главные центральные оси инерции, которые затем используются для нахождения центра кручения. Нами проведено сравнение с расчетами некоторых тонкостенных незамкнутых профилей по существующим методикам, представленным в учебной литературе. Совпадение данных весьма высоко, что позволяет с уверенностью использовать программу для расчета многих типов тонкостенных профилей.

На сегодняшний момент актуальным является возможное распространение применяемого подхода к расчету основных геометрических характеристик элементов энергетических установок с сечением в виде сложного тонкостенного криволинейного профиля. Нами проведены



$$F = \sum_{i=1}^5 l_i \delta_i = 4b\delta_1 + 2(b+h)\delta_2 = 226 \text{ cm}^2.$$

$$J_{x_c} = J_x - y_c^2 F = 26460 - 6,23^2 \cdot 226 = 17700,49 \text{ cm}^4,$$

$$J_{y_c} = J_y - x_c^2 F = J_y = 176333,33 \text{ cm}^4.$$

$$C_x = 0 \text{ cm}; \quad C_y = 3,26 \text{ cm}.$$

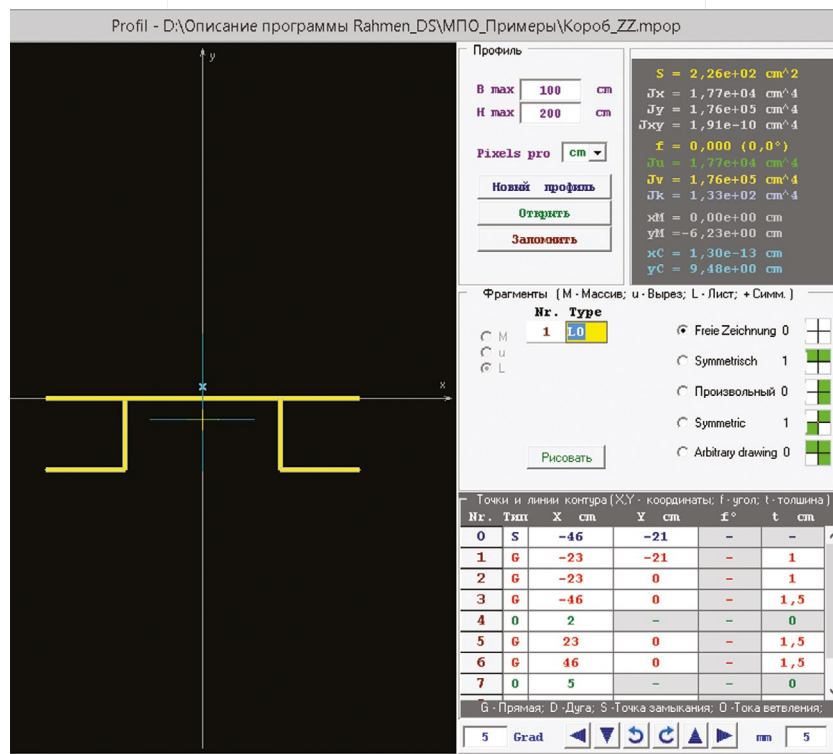


Рис. 2. Результаты расчетов прямолинейного профиля.

Fig. 2. Calculation of a line profile.

исследования некоторых подобных сечений, где за основу брали криволинейные участки, построенные по радиусу (рис. 3–5). Анализируя полученные расчетные значения, можно сделать вывод о целесообразности применения автоматизированного расчета для тонкостенных криволинейных сечений, ввиду сокращения времени на осуществление расчетов и повышения их точности. Несомненное преимущество данной программы связано и с тем, что в процессе расчета можно варьировать непосредственно размерами и формами сложных сечений, тем самым наглядно выбирая и демонстрируя наиболее оптимальное решение при проектировании деталей и узлов различных энергетических и механических установок.

В процессе оптимизации определяются площадь проектируемого сечения, основные инерциальные характеристики тонкостенных криволинейных сечений, такие как моменты инерции, центр тяжести и в нашем случае

наиболее важная — точка центра кручения, положение которой существенным образом влияет на прочностные характеристики сечений. Как видно из рис. 4, программа позволяет определять основные геометрические характеристики сложных тонкостенных криволинейных профилей. Анализируя данные, можно сделать вывод о возможности применения данного алгоритма расчета для сечений с различными сложными тонкостенными криволинейными профилями.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения теоретических предпосылок правильности расчета программы нами проведены экспериментальные исследования определения центра кручения открытого профиля. В качестве экспериментального

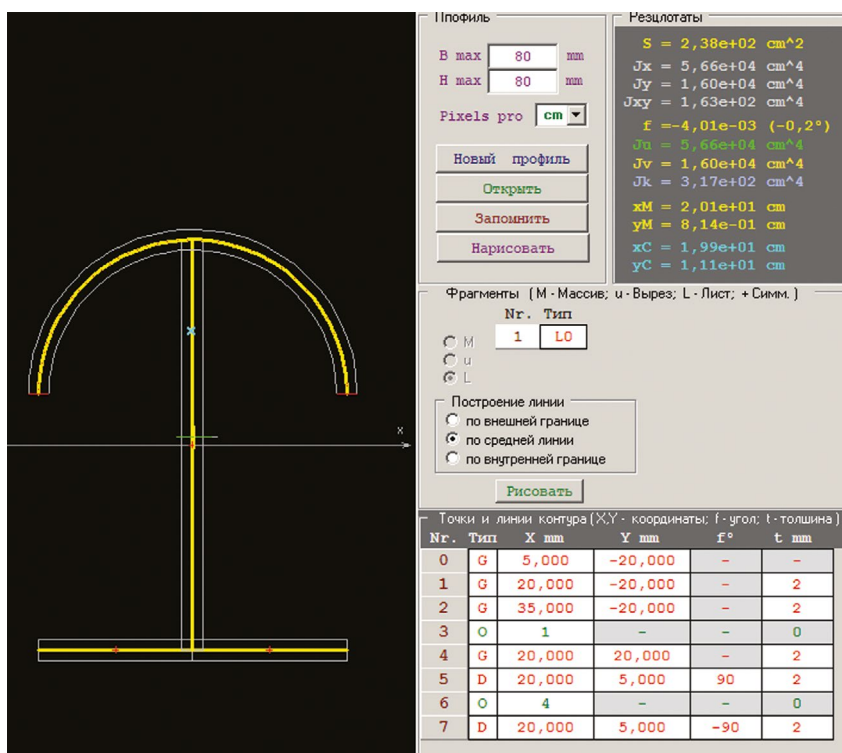


Рис. 3. Результаты расчетов криволинейного профиля (центр кручения расположен на оси симметрии профиля)
Fig. 3. Calculations of a curved profile (shear center is located on the center line of the profile).

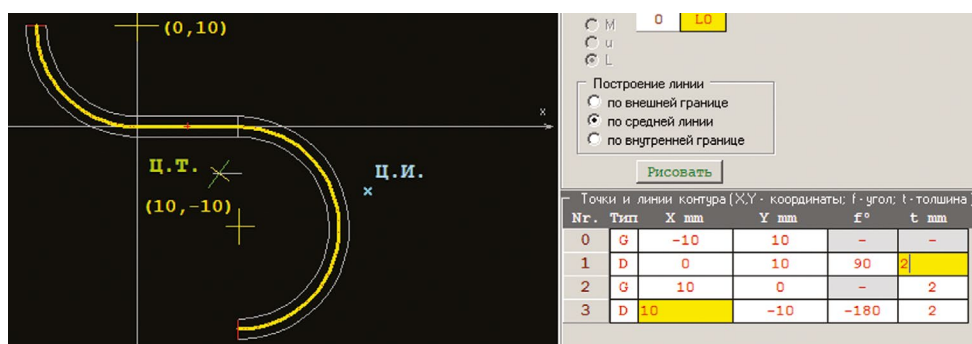


Рис. 4. Результаты расчетов криволинейного профиля (центр кручения расположен вне контура сечения профиля)
Fig. 4. Calculations of a curved profile (shear center is located outside the cross-section of the profile).

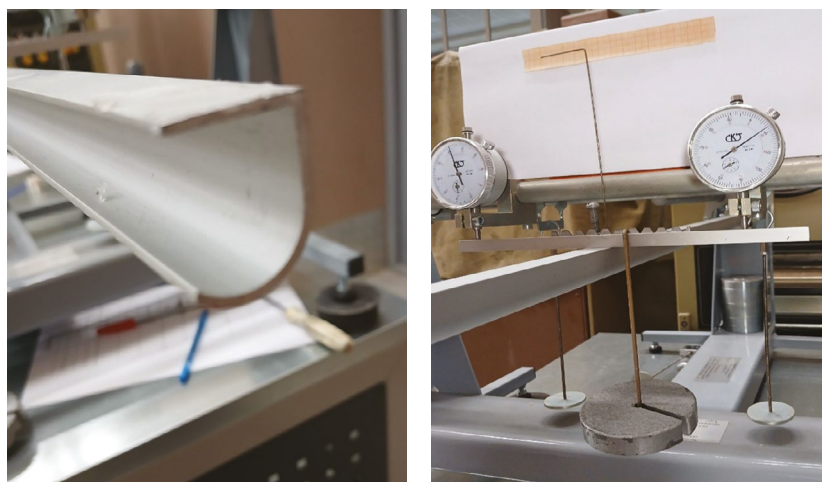


Рис. 5. Внешний вид экспериментальной балки.
Fig. 5. Experimental beam.

профиля была выбрана балка с прямолинейно-криволинейным поперечным сечением, представленная на рис. 5. Размерные характеристики балки полностью соответствуют понятию балок с тонкостенным незамкнутым сечением, а именно использовались алюминиевые балки длиной 90 см и 50 см с толщиной стенки 2 мм с габаритами сечения 20 на 25 мм.

На прямолинейной стороне балки (рис. 6) прикреплен гребенка с делениями в 10 мм, с помощью которой контролируют положение гиревого подвеса. На расстоянии 20 см по обеим сторонам гребенки устанавливаются индикаторы, которые фиксируют прогиб конца балки при установленной плоскости нагружения. При перемещении подвеса с грузом слева направо измеряются деформации по обоим индикаторам, после чего вычисляется разность приращений левого и правого. По мере приближения к центру кручения разность приращений уменьшается, и положение самой точки кручения будет там, где приращения изменяют свой знак. При этом показания одного из индикаторов, укрепленных на гребенке, увеличиваются, а другого уменьшаются. Особенностью

лабораторной установки является использование в качестве измерительного инструмента обычной линейки, закрепленной вблизи направляющей, по которой представляется подвес с грузом.

Следует обратить внимание на то, что расстояния до центра кручения аналитически и экспериментально определяются от разных точек начала отсчета: аналитически — от срединной линии профиля, экспериментально — слева от горизонтальной грани профиля.

Порядок проведения опытов:

1. Закрепить струбциной гребенку на любой удобной поверхности профиля, таким образом, чтобы будущая силовая линия нагружения прошла через крайнюю точку профиля.
2. Установить гиревой подвес в крайнюю левую точку гребенки (точка на линейке на цифре 0); снять показания индикаторов при отсутствии внешних сил и занести их в таблицу.
3. Уложить груз массой 100 или 150 г на гиревой поднос; снять показания обоих индикаторов и занести их в таблицу.

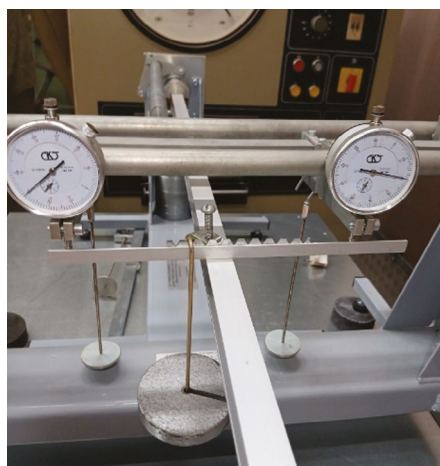
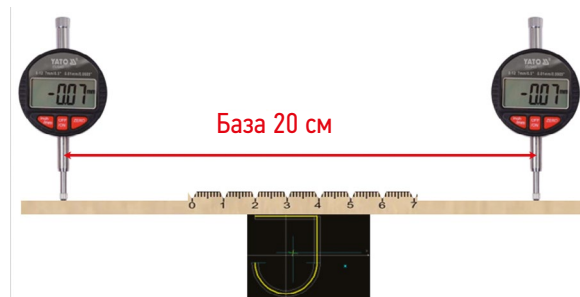


Рис. 6. Лабораторная установка для определения центра кручения.
Fig. 6. Laboratory setup used to determine the shear center.



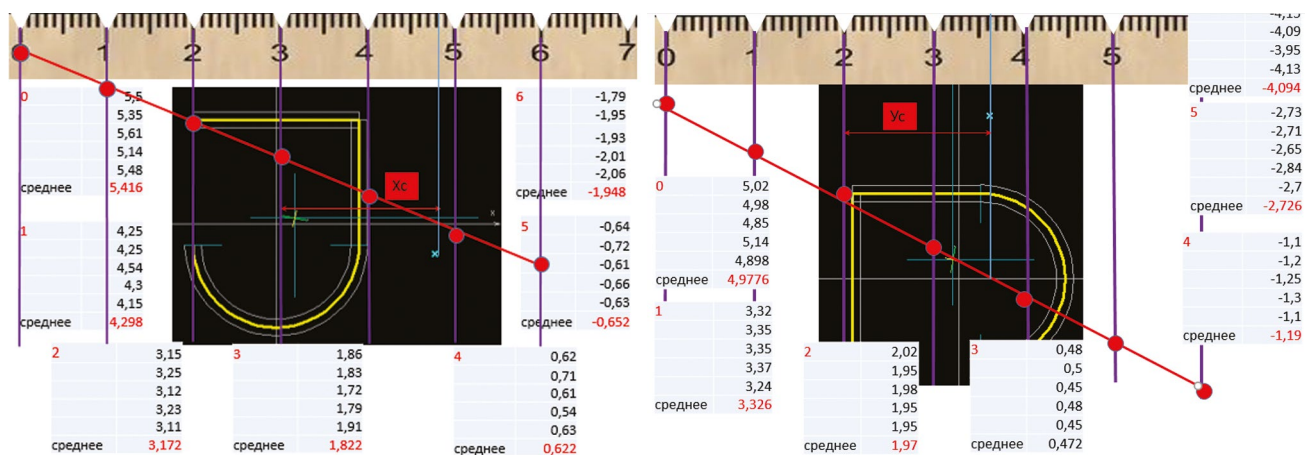


Рис. 7. Графическое определение центра кручения в разных плоскостях.
Fig. 7. Graphic shear center calculation in different planes.

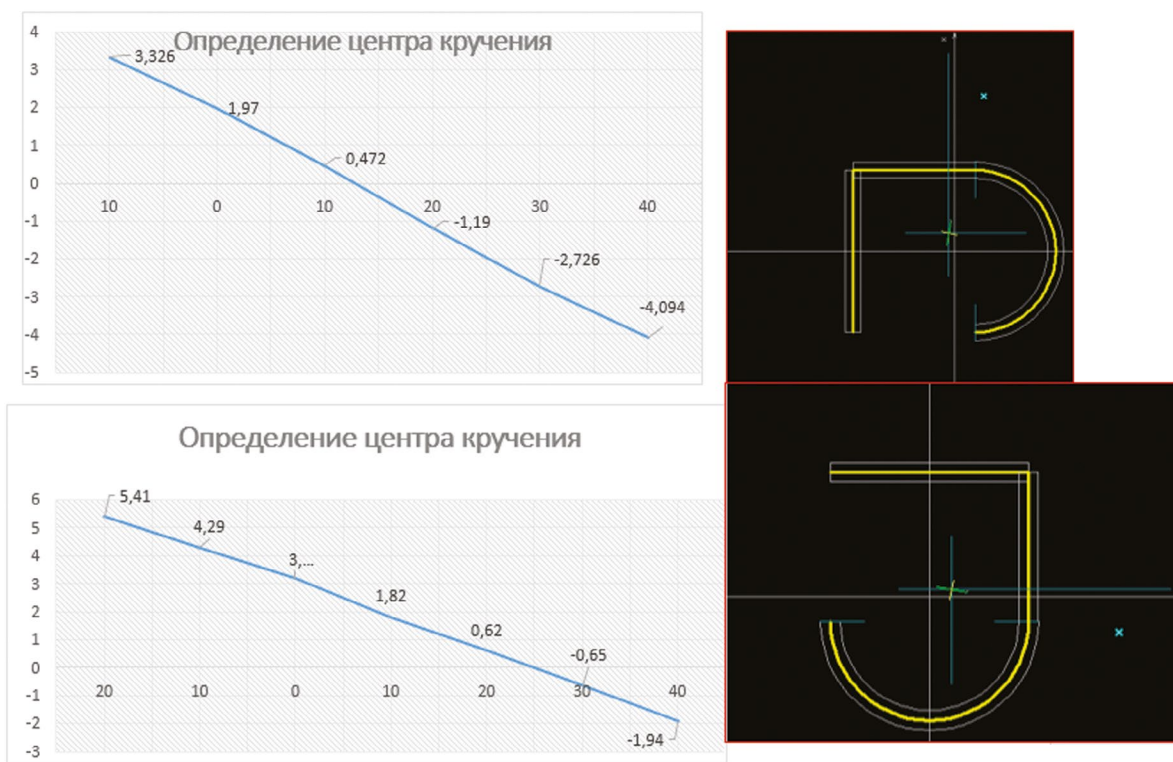


Рис. 8. Графическое определение центра кручения в разных плоскостях.
Fig. 8. Graphic shear center calculation in different planes.

4. Снять груз и переместить подвес каретку на 10 мм в сторону предполагаемого нахождения центра изгиба (вправо); снять показания индикаторов при ненагруженном состоянии лабораторной установки и занести их в таблицу.
5. Повторить пункты 3 и 4 несколько раз. Построить график зависимости разности приращений от точек прохождения силовой плоскости нагружения. Определить координату силовой плоскости, проходящей через центр кручения (точка пересечения нулевой линии).
6. Закрепить струбиной гребенку на любой другой поверхности профиля, таким образом, чтобы будущая силовая линия нагружения прошла через крайнюю точку профиля.
7. Повторить пункты 2, 3, 4, 5.
8. Построить совместный график, наложенный на расчетное сечение по электронной программе, проверить точность теоретического расчета координат центра кручения и опытных значений (рис. 7).

Для наглядного изучения деформации балки тонкостенного профиля был проведен отдельный эксперимент. С этой целью на поверхность балки был закреплен «маячок» в виде тонкого Г-образного очертания. Подвес с грузом устанавливался на гребенку в том месте, где были получены точки пересечения графиков (рис. 8) с нейтральной осью. Представленный фотоматериал наглядно свидетельствует об отсутствии кручения балки, а прогиб происходит в вертикальной плоскости, то есть с отсутствием малейшего намека на кручение (рис. 9).

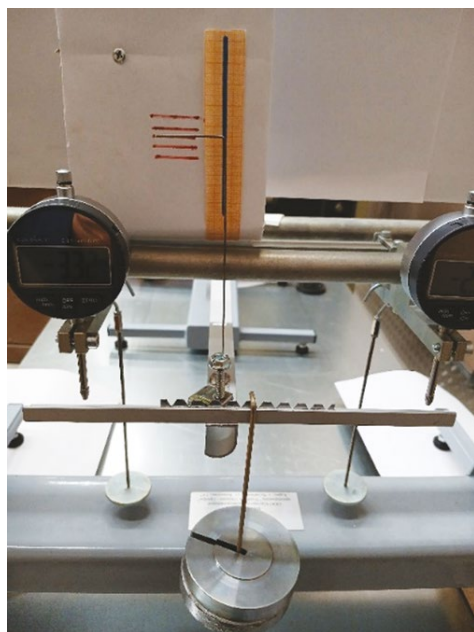


Рис. 9. Наглядное изучение центра кручения.
Fig. 9. Observation of the shear center.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам работы, проведенной сотрудниками кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», можно сделать следующие выводы:

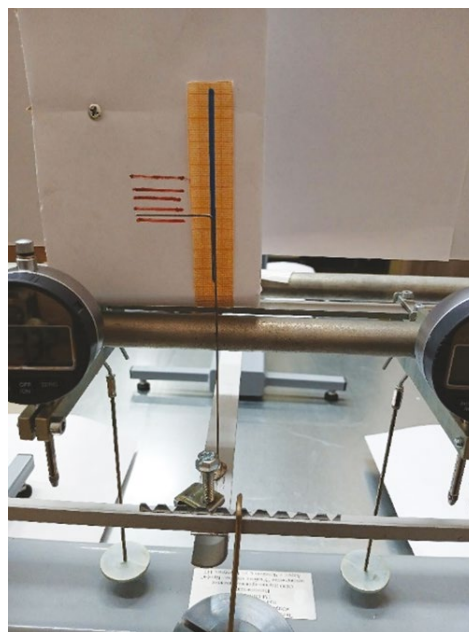
Разработан алгоритм построения поперечных сечений различного профиля, позволяющий рассчитать основные геометрические характеристики тонкостенных криволинейных профилей, такие как площадь и центр тяжести сечения, полярный, центробежный и осевые моменты инерции, центр кручения.

Изготовлена лабораторная установка для определения центра кручения тонкостенных профилей с методикой экспериментальных исследований.

Проведены лабораторные исследования по определению центра кручения для балки с незамкнутым тонкостенным профилем прямолинейно-криволинейного очертания.

Экспериментально подтверждено совпадение теоретических расчетов определения центра кручения с опытными данными. При пятикратной повторности исследований на каждой точке нагружения разница теоретических данных с экспериментом не превышала $\pm 0,3\%$.

Таким образом, разработанная электронная программа для расчетов основных геометрических параметров поперечных сечений балок может быть использована как в учебных целях, так и для дальнейших научных исследований при конструировании и совершенствовании различных элементов машин и технологического оборудования.



ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: А.Н. Андреев — разработка методики лабораторных исследований, изготовление экспериментальной установки; Д.А. Николаев — написание программы расчета жесткостных характеристик поперечных сечений.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: A.N. Andreev, development of laboratory research methods, manufacture of an experimental facility; D.A. Nikolaev, writing a program for calculating the stiffness characteristics of cross-sections.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.Н., Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Алгоритм и программа определения положения центра кручения тонкостенного профиля. В кн.: Тезисы докладов конференции «Памяти академиков-кораблестроителей». Санкт-Петербург: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2023. С. 75–76.
2. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Квазиодномерные модели для анализа параметров вибрации судового корпуса на ранних стадиях его проектирования // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2–1. С. 45–51. EDN: WADFQY
3. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Совместная вибрация судового корпуса и его конструктивных модулей с малым рай-

оном сопряжения // Морской вестник. 2022. № 1. С. 17–19. EDN: GVHBYK

4. Челпанова Н.Г., Кадисов Г.М. Расчет тонкостенных стержней открытого профиля. Методические указания к выполнению расчетно-графических работ. Омск: СибАДИ, 2008.

5. Александров В.Л., Матлах А.П., Поляков В.И. Борьба с вибрацией на судах. Санкт-Петербург: Мор Вест, 2005. 421 с. EDN: QNSOHV

6. Свидетельство о регистрации № 2023680773/04.10.23. Бабанин Н.В., Мелконян А.Л., Титова Ю.Ф. Программа для расчета вибрации квазиодномерной конструкции.

REFERENCES

1. Andreev AN, Melkonian AL, Nikolaev DA. Algorithm and program for determining the position of the torsion center of a thin-walled profile. In: *Theses of reports of the conference "In memory of academicians-shipbuilders"*. Saint Petersburg: Federal State Unitary Enterprise "Krylov state research center"; 2023. P. 75–76. (In Russ.)
2. Melkonian AL, Nikolaev DA. Quasi-one-dimensional models for the analysis of parameters of vibration of the ship hull at early stages of his design. *Marine intelligent technologies*. 2019;(2–1):45–51. EDN: WADFQY
3. Melkonian AL, Nikolaev DA. Joint vibration of a ship hull and its structural modules with a small interface area. *Marine Bulletin*. 2022;(1):17–19. EDN: GVHBYK (In Russ.)

4. Chelpanova NG, Kadisov GM. *Calculation of thin-walled rods of open profile. Methodical instructions for realization of calculation-graphic works*. Omsk: SibADI; 2008. (In Russ.)

5. Alexandrov VL, Matlakh AP, Polyakov VI. *Combating vibration on ships*. Saint Petersburg: Mor West; 2005. 421 p. EDN: QNSOHV (In Russ.)

6. Registration certificate N 2023680773/04.10.23. Babanin NV, Melkonian AL, Titova YuF. *Program for calculation of vibration of quasi one-dimensional structure*. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

***Александр Николаевич Андреев**, канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3; ORCID: 0000-0003-3775-4482; eLibrary SPIN: 2134-5414; e-mail: aan300@list.ru

Дмитрий Александрович Николаев, канд. техн. наук; e-mail: d.nikolaev@d-nik.de

AUTHORS' INFO

***Alexander N. Andreev**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at the Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; ORCID: 0000-0003-3775-4482; eLibrary SPIN: 2134-5414; e-mail: aan300@list.ru

Dmitriy A. Nikolaev, Cand. Sci. (Engineering); e-mail: d.nikolaev@d-nik.de

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 629.5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_15

Оригинальное исследование

Апробация вибродиагностического метода для обнаружения дефектов крепления при ослаблении натяжения крепежного элемента

И.В. Буковский, О.В. Хруцкий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Одной из причин повышенной вибрации роторного оборудования является потеря стягивающей нагрузки между подшипниковым узлом и фундаментом, что может быть вызвано дефектами крепежных элементов, такими как износ резьбы, ослабление затяжки, коррозия, усталость металла и другие. Такие дефекты ведут к росту вибрации, ухудшению работы оборудования и его преждевременному износу. Для предотвращения таких негативных последствий в вибродиагностике существует методика, позволяющая установить наличие дефектов в крепежных элементах на основе анализа коэффициентов, однако доступные источники указывают на отсутствие дифференцированного подхода к различным видам дефектов крепежных элементов. Нет экспериментальных данных, подтверждающих эффективность этой методики для обнаружения конкретных типов дефектов в рамках общей категории.

Цель — оценка эффективности данного метода для установления факта наличия дефекта в крепежном узле, вызванного ослаблением натяжения винта, соединяющего лапу стойки подшипника с фундаментом.

Материалы и методы. Применен вибродиагностический метод, основанный на анализе коэффициентов, для выявления дефектов в крепежном узле, вызванных ослаблением затяжки крепежного винта. В рамках исследования была проведена экспериментальная проверка методики, основанной на анализе коэффициентов, представляющих собой отношение общих уровней вибрации на конструктивных частях подшипникового узла и фундаменте.

Результаты. В ходе экспериментов измерялось среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости в трех плоскостях на различных компонентах имитационного стенда AP7000 посредством анализатора СД-21 и датчика вибрации AP40. Полученные данные использовались для расчета коэффициентов, характеризующих состояние крепления.

Наиболее информативными для диагностики крепежных узлов роторного оборудования являются коэффициенты, рассчитанные как отношение СКЗ на корпусе подшипникового узла к СКЗ на фундаменте в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также отношение СКЗ на лапе стойки подшипника к СКЗ на фундаменте в вертикальной плоскости. Только эти коэффициенты позволяют достоверно устанавливать наличие дефектов креплений при ослаблении затяжки крепежных винтов.

Выводы. Результаты исследования подтвердили практическую ценность рассматриваемой методики для выявления дефектов в крепежном узле, вызванных ослаблением затяжки винта.

Ключевые слова: вибродиагностика; подшипниковый узел; вибрация; виброанализатор; СКЗ; коэффициенты; затяжка винта; дефект крепления; крепежный винт; общий уровень вибрации; факт наличия дефекта; критический порог; область допустимых значений; AP7000; СД-21; AP-40.

Как цитировать

Буковский И.В., Хруцкий О.В. Апробация вибродиагностического метода для обнаружения дефектов крепления при ослаблении натяжения крепежного элемента // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 15–22. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_15

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_15

Original study article

Testing vibration diagnostic method to detect fastening defects due to slackening

Ilya V. Bukovsky, Oleg V. Khrutsky

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: One cause of increased vibration in rotary equipment is the loss of clamp load between the bearing assembly and the foundation caused by fastening defects, including thread wear, slacking, corrosion, metal fatigue, etc. Such defects lead to increased vibration, reduced equipment performance, and its early wear. To prevent such negative effects, a method is used in vibration monitoring to identify defects in fasteners based on the analysis of factors; however, available sources indicate that there are no differentiated approaches to various types of fastener defects.

AIM: The article examines the performance of this method to identify fastening defects occurring due to slacking of the fastener that connects the bearing bracket leg to the foundation.

MATERIALS AND METHODS: There is no experimental data to support the performance of this method in identifying specific defects within the general category. The article examines the possible use of a vibration diagnostic method based on the analysis of factors to identify fastening defects caused by slacking of fastening screws. The study includes an experimental validation of the method based on the analysis of factors, i.e. the ratio of overall structure vibration of the bearing assembly and the foundation.

RESULTS: During the experiments, the root mean square (RMS) value of vibration velocity was measured in three planes on various components of AP7000 simulation test bench using SD-21 analyzer and AP40 vibration sensor. The data were used to calculate factors characterizing the fastening health. The most insightful factors to identify defects in fasteners of rotary equipment include those calculated as the ratio of the bearing housing RMS to the foundation RMS in horizontal and vertical planes and the ratio of the bearing bracket leg RMS to the foundation RMS in the vertical plane. Only these factors allow to reliably identify fastening defects when the fastening screws are loose.

CONCLUSIONS: The results confirmed that the considered method is useful in identifying fastening defects caused by screw slacking.

Keywords: vibration diagnostics; bearing assembly; vibration; vibration analyzer; SKZ; coefficients; screw tightening; fastening defect; fixing screw; general vibration level; the fact of a defect; critical threshold; range of permissible values; AR7000; SD-21; AR-40.

To cite this article

Bukovsky IV, Khrutsky OV. Testing vibration diagnostic method to detect fastening defects due to slackening. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):15–22. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_15

Received: 29.01.2025

Accepted: 10.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин повышенной вибрации роторного оборудования, к числу которых также относятся различные судовые агрегаты, часто является потеря части стягивающей нагрузки между основаниями опор установки и фундаментом. Снижение жесткости соединения чаще всего связано с различными дефектами крепежных элементов, среди которых можно выделить: износ или повреждение резьбы, ослабление натяжения крепежного элемента, коррозию крепежных элементов, усталостные трещины на крепежных элементах, деформации крепежных элементов. Появление хотя бы одного из перечисленных дефектов приводит к повышению общего уровня вибрации, что в итоге может негативно сказаться на работоспособности оборудования, привести к преждевременному износу его компонентов и даже вызвать аварийные ситуации.

Анализ ряда открытых интернет-ресурсов, специализирующихся на рассмотрении различных методик, применяемых в вибродиагностике, показал, что характерными параметрами, позволяющими дать оценку текущему состоянию качества крепления машины к фундаменту как удовлетворительному или неудовлетворительному, являются коэффициенты, рассчитанные как отношения общих уровней вибрации, зафиксированных на элементах подшипникового узла и фундаменте диагностируемого оборудования. Если значения этих коэффициентов превысят установленный критический порог, который соответствует значению 3,0, это может указывать на наличие потенциальных проблем с креплением агрегата к фундаменту.

Тем не менее среди изученных интернет-источников отсутствует какая-либо конкретная и экспериментально подтвержденная информация о зависимостях, устанавливаемых между различными видами дефектов элементов крепления и коэффициентами, рассчитываемыми по данной методике. В частности, остаются открытыми следующие вопросы:

1. Какие типы дефектов крепежных элементов приводят к выходу рассчитанных коэффициентов за пределы допустимых значений, а какие — нет?
2. Как влияет интенсивность развития определенного дефекта на значения коэффициентов?
3. Какой из коэффициентов наиболее чувствителен к различным типам дефектов?
4. Насколько выраженным должен быть дефект крепежного элемента, чтобы можно было установить факт его наличия по данным коэффициентам?
5. В каких плоскостях и точках на элементах подшипникового узла и фундаменте необходимо и достаточно измерять общие уровни вибрации для последующего расчета коэффициентов?

Ответы на поставленные вопросы позволят выявить, какие именно дефекты крепления можно выявить

(установить факт наличия) с использованием методики, основанной на анализе коэффициентов.

Принцип методики, основанной на анализе коэффициентов, вычисленных как отношение общих уровней вибрации на конструктивных элементах диагностируемого агрегата

Метод диагностики ослабления крепления машины к фундаменту по общему уровню вибрации подразделяется на несколько этапов:

1. Измеряется среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости в трех взаимно перпендикулярных плоскостях на корпусе подшипникового узла (датчик вибрации устанавливается на верхней части крышки подшипникового узла со стороны крепежного винта), лапе стойки подшипника (датчик вибрации крепится как можно ближе к крепежному винту на лапе стойки подшипника) и непосредственно самом фундаменте (датчик вибрации размещается вблизи стойки подшипника с диагностируемым крепежным винтом). В случае, если отсутствует прямой доступ к подшипниковому узлу, измерения СКЗ виброскорости проводится как можно ближе к предполагаемым местам расположения верхней части крышки подшипникового узла и лапы стойки подшипника на жестком участке корпуса диагностируемого агрегата.
2. По результатам измерений рассчитываются три коэффициента K_1 , K_2 , K_3 (далее — $K_{1,2,3}$, если речь идет сразу о трех коэффициентах), как отношение общих уровней вибрации в одноименных плоскостях:

$$K_1 = \text{СКЗ}_{\text{коп}} / \text{СКЗ}_{\text{лсп}}; \quad (1)$$

$$K_2 = \text{СКЗ}_{\text{лсп}} / \text{СКЗ}_{\text{ф}}; \quad (2)$$

$$K_3 = \text{СКЗ}_{\text{коп}} / \text{СКЗ}_{\text{ф}}; \quad (3)$$

где $\text{СКЗ}_{\text{коп}}$ — среднеквадратическое значение виброскорости, измеренное на верхней части крышки корпуса опорного подшипника, мм/с; $\text{СКЗ}_{\text{лсп}}$ — среднеквадратическое значение виброскорости, измеренное на лапе стойки подшипника, мм/с; $\text{СКЗ}_{\text{ф}}$ — среднеквадратическое значение виброскорости, измеренное на фундаменте.

3. Сравнение полученных коэффициентов с установленными допустимыми значениями и определение текущего состояния диагностируемого крепежного элемента: 1. «Нормальное» состояние — крепление сохраняет достаточный уровень стягивающей нагрузки (данное состояние присваивается крепежным элементам, если для всех коэффициентов, определенных в трех плоскостях, выполняется условие — $K_{1,2,3} < 2,5$); 2. «Ослабленное» состояние — частичная потеря стягивающей нагрузки, но крепежные элементы все еще выполняют свои функции (данное состояние присваивается крепежным элементам, если хотя бы для одного из коэффициентов, определенных в трех плоскостях,

выполняется условие — $2,5 \leq K_{1,2,3} \leq 3,0$). «Критическое» состояние — существенная потеря стягивающей нагрузки, крепежные элементы свои функции более не выполняют (данное состояние присваивается крепежным элементам, если хотя бы для одного из коэффициентов, определенных в трех плоскостях, выполняется условие — $K_{1,2,3} > 3,0$)¹ [1].

Цель и задачи исследования

Проводимое исследование было направлено на экспериментальное подтверждение возможности применения рассматриваемого вибродиагностического метода для выявления дефектов крепления, возникающих из-за ослабления натяжения крепежного элемента, соединяющего лапу стойки подшипника с фундаментом.

Основные задачи исследования были направлены на определение:

- 1) возможности установить факт наличия дефекта крепления по расчетным коэффициентам $K_{1,2,3}$ при ослаблении затяжки крепежного винта, соединяющего лапу стойки подшипника с фундаментом (отбор коэффициентов, значения которых хотя бы один раз превышали допустимые пределы — $K_{1,2,3} > 3,0$, но только в условиях раскрученного крепежного винта);
- 2) минимальной степени раскручивания крепежного винта, достаточной для выхода значений коэффициентов $K_{1,2,3}$ из области допустимых значений ($K_{1,2,3} > 3,0$);
- 3) коэффициентов, наиболее чувствительных к раскручиванию крепежного винта (отбор коэффициентов, значения которых наиболее существенно превышают установленный критический порог, равный 3,0, при различных степенях затяжки винта);
- 4) воздействия ослабления степени затяжки крепежного элемента на значения коэффициентов, по которым можно установить факт наличия дефекта крепления (рассматривается динамика изменения значений коэффициентов от степени ослабления крепежного винта, с целью зафиксировать возможное снижение значений коэффициентов ниже критического порога при ослаблении степени затяжки винта);

- 5) необходимых и достаточных реперных точек для установки первичных преобразователей вибрации на фундаменте и элементах подшипникового узла.

СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Элементная база, которая использовалась в эксперименте для имитации дефекта и его выявления:

- 1) стенд имитационный AP7000 — экспериментальный агрегат для регистрации сигналов вибрации при работе в бездефектном состоянии и при постепенном ослаблении крепежных элементов, соединяющих стойки подшипниковых узлов с фундаментом²;
- 2) виброанализатор СД-21 — устройство для сбора, анализа и отображения данных о вибрации, поступающих от датчика AP40, в форме среднеквадратичного значения³;
- 3) первичный преобразователь AP40 — датчик для регистрации параметров вибрации на контрольных точках подшипникового узла и фундамента⁴;
- 4) спектр-07 и фототахометр ТСТ 1100.01 — диагностический комплекс и совместимый с ним тахометрический датчик для отслеживания текущей частоты вращения роторного оборудования⁵.

ХОД ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения и регистрация общих уровней вибрации проводились с использованием виброанализатора СД-21 и первичного преобразователя AP40. Они заключались в фиксации СКЗ виброскорости при пошаговом раскручивании крепежного винта на 1/8 от полного оборота (45°) из исходного положения (0° — винт полностью закручен) до момента, когда крепежный винт перестает оказывать давление на лапу стойки опорного подшипника (винт раскручен на 3/4 от полного оборота или 270°).

Датчик вибрации AP40 в процессе проведения измерений поочередно устанавливался на конструктивные части подшипникового узла (верхнюю часть крышки корпуса подшипникового узла, лапу стойки

¹ Вибрационная диагностика состояния фундаментов // Компания Вибро-Центр. Приборы и программы для контроля и диагностики оборудования. URL: <https://vibrocenter.ru/book13.html> (дата обращения: 21.04.2024); Диагностика фундаментов, вибродиагностика фундаментов. BALTECH // Статьи по теме основы вибродиагностики и динамической балансировки. BALTECH. URL: <http://vibropoint.ru/diagnostika-fundamentov/> (дата обращения: 21.04.2024).

² Стенд имитационный AP7000. УЧЕБНАЯ ТЕХНИКА // Компания «Учебная техника» поставщик учебного оборудования. URL: <https://учебнаятехника.рф/wps/stend-imitacionnyj-ar7000/?ysclid=m74qbmppsp53548026> (дата обращения: 23.04.2024).

³ Виброанализатор СД-21 // Компания СЕТРИКС — оборудование для контроля и анализа вибрации. Измерительные приборы для диагностики. URL: <https://www.setrix.ru/p/vibroanalizator-sd-21> (дата обращения: 23.04.2024).

⁴ Вибропреобразователи пьезоэлектрические AP40, 16602-12. Справочник средств измерений Поверь.ру // Центр поверки средств измерений в Москве — Поверь.ру. URL: <https://www.pover.ru/spravochnik-sredstv-izmerenij/16602-12-vibropreobrazovateli-pezelektricheskie-ar40-isp/> (дата обращения: 23.04.2024).

⁵ Переносной вибродиагностический комплекс «Спектр-07» // АО «ТСТ» — Вибродиагностика, балансировка, центровка, вибромониторинг оборудования, виброанализаторы, виброконтроль, приборы измерения вибрации. URL: <https://tst-spb.ru/products/spectr-07> (дата обращения: 23.04.2024); Датчики // АО «ТСТ» — Вибродиагностика, балансировка, центровка, вибромониторинг оборудования, виброанализаторы, виброконтроль, приборы измерения вибрации. URL: <https://www.tst-spb.ru/products/sensors> (дата обращения: 23.04.2024).

подшипника) и фундамента (рядом со стойкой подшипникового узла с диагностируемым крепежным винтом) стэнда AP7000 в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (в вертикальном, осевом и горизонтальном направлениях по отношению к валу электродвигателя имитационного стэнда)⁶.

Измерения общих уровней вибрации на имитационном стэнде осуществлялись в условиях, когда диагностируемый агрегат не находился под действием внешнего возбуждающего дефекта, такого как дисбаланс, расцентровка,

сильный износ опорных подшипников, изгиб вала, перекосяк опор и т.д.

Для определения фактических значений частоты вращения вала электродвигателя стэнда AP7000, с целью контроля и обеспечения одинаковых условий при проведении эксперимента, использовались сборщик данных Спектр-07 и фототахометр ТСТ 1100.01.

Таким образом, проведенные измерения позволили получить данные, которые отображены в табл. 1. В данной таблице представлены усредненные результаты десяти

Таблица 1. Среднеквадратическое значение виброскорости в трех плоскостях измерения на конструктивных элементах имитационного стэнда AP7000

Table 1. Root mean square vibration velocity in three measurement planes of structures of AP7000 simulation test bench

Направление измерений	Параметр	Положение винта, градус							Частота, Гц
		0	45	90	135	180	225	270	
Корпус подшипникового узла									
Вертикаль	СКЗ, мм/с	0,74	0,84	0,82	1,48	3,67	3,24	3,99	30
Горизонт	СКЗ, мм/с	1,38	1,25	1,38	2,41	4,77	5,19	5,67	30
Ось	СКЗ, мм/с	1,03	1,15	1,14	1,4	2,66	2,34	2,57	30
Лапа стойки подшипника									
Вертикаль	СКЗ, мм/с	1,17	1,44	1,35	3,02	9,34	8,04	8,02	30
Горизонт	СКЗ, мм/с	1,39	1,44	1,46	3,56	3,43	3,64	4,53	30
Ось	СКЗ, мм/с	1,09	1,18	1,19	1,29	1,68	1,81	2,44	30
Фундамент									
Вертикаль	СКЗ, мм/с	0,7	0,99	0,91	0,97	1,06	1,04	1,22	30
Горизонт	СКЗ, мм/с	1,22	1,34	1,36	1,48	1,68	1,75	1,83	30
Ось	СКЗ, мм/с	0,34	0,5	0,35	0,36	0,31	0,31	0,36	30

Примечание: СКЗ — среднеквадратическое значение.

Note: СКЗ, root mean square value.

Таблица 2. Значения коэффициентов в трех плоскостях

Table 2. Factor values in three planes

Направление измерений	Коэффициенты	Положение винта, градус						
		0	45	90	135	180	225	270
Вертикаль	K1	0,63	0,58	0,61	0,49	0,39	0,40	0,50
Горизонт	K1	0,99	0,87	0,95	0,68	1,39	1,43	1,25
Ось	K1	0,95	0,97	0,96	1,09	1,58	1,29	1,05
Вертикаль	K2	1,68	1,45	1,48	3,11	8,81	7,73	6,57
Горизонт	K2	1,14	1,07	1,07	2,41	2,04	2,08	2,48
Ось	K2	3,21	3,37	3,40	3,58	5,33	5,80	6,78
Вертикаль	K3	1,06	0,85	0,90	1,53	3,46	3,12	3,27
Горизонт	K3	1,13	0,93	1,01	1,63	2,84	2,97	3,10
Ось	K3	3,04	3,29	3,26	3,89	8,44	7,50	7,14

⁶ Измерение вибрации, методы измерения вибрации, измерение вибрации акселерометром, средства измерения вибрации, точки измерения вибрации, правила измерения вибрации. BALTECH // Статьи по теме основы вибродиагностики и динамической балансировки. BALTECH. URL: <http://vibropoint.ru/izmerenie-vibracii/> (дата обращения: 21.04.2024).

измерений СКЗ виброскорости для каждой точки, зафиксированные на конструктивных частях стенда AP7000 в различных плоскостях при семи различных степенях затяжки крепежного винта, когда диагностируемый агрегат не подвергался воздействию внешнего возбуждающего дефекта.

По данным, приведенным в табл. 1, с использованием формул (1–3) был выполнен расчет коэффициентов K1, K2, K3 для каждой плоскости и при семи различных положениях крепежного винта. Результаты расчета коэффициентов отображены в табл. 2.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Анализ, проведенный с опорой на представленные в табл. 2 данные, позволил выявить, что:

- факт наличия ослабления крепежного элемента, вызванного его раскручиванием, можно безошибочно установить только по коэффициентам K2 (вертикаль) и K3 (вертикаль, горизонт). Однако это возможно не при всех исследуемых степенях затяжки винта. У прочих коэффициентов были выявлены некоторые недостатки: K1 (вертикаль, горизонт, ось) и K2 (горизонт) не превысили установленный критический порог для данной методики при всех рассмотренных степенях затяжки винта. В то же время коэффициенты K2 (ось) и K3 (ось) превысили этот порог при исходном положении крепежного винта, т.е. в случае, когда он был полностью закручен. По этим причинам коэффициенты K1 (вертикаль, горизонт, ось), K2 (горизонт, ось) и K3 (ось) не были включены в дальнейший анализ. На рис. 1 представлены данные из табл. 2, иллюстрирующие распределение значений коэффициентов

по различным степеням затяжки винта относительно критического порога (численное значение равно 3,0);

- минимальная степень ослабления затяжки крепежного винта, при которой можно достоверно установить факт наличия соответствующего дефекта, варьируется в зависимости от рассматриваемого коэффициента. Для K2 (вертикаль) — винт раскручен на 3/8 от полного оборота или 135°, для K3 (вертикаль) — винт раскручен на 1/2 от полного оборота или 180°, K3 (горизонт) — винт раскручен на 3/4 от полного оборота или 270°;
- коэффициенты K2 (вертикаль) и K3 (вертикаль, горизонт) демонстрируют различную реакцию на изменения степени затяжки крепежного винта. Наиболее чувствительным к ослаблению стягивающей нагрузки между опорами агрегата и фундаментом оказался коэффициент K2 (вертикаль). Это подтверждается данными, представленными в табл. 3, где указано процентное отклонение коэффициентов от критического порога при тех степенях затяжки, которые позволяют установить факт наличия дефекта;
- показатели коэффициентов K2 (вертикаль) и K3 (вертикаль) после выхода из области допустимых значений не снижались ниже установленного критического порога даже при дальнейшем наращивании ослабления стягивающей нагрузки. В то же время коэффициент K3 (горизонт) превысил критический порог лишь один раз, и это произошло только при максимальном ослаблении затяжки крепежного винта. Поэтому рассмотреть динамику изменения значений данного коэффициента от степени затяжки винта не представляется возможным;

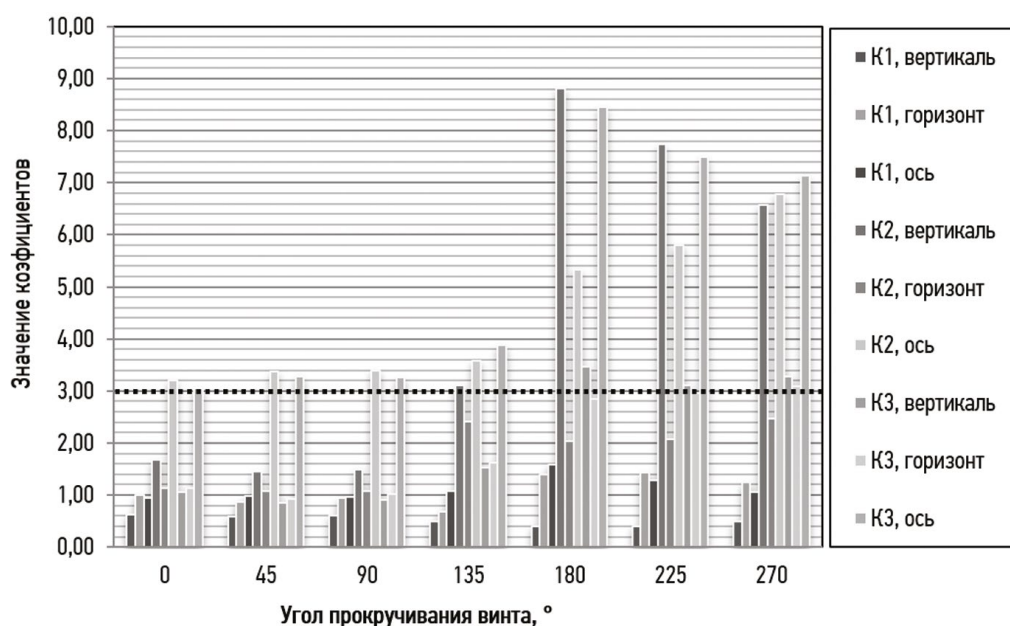


Рис. 1. Распределение значений коэффициентов по различным степеням затяжки винта относительно критического порога.
Fig. 1. Distribution of factor values for different screw tightening degrees relative to the critical threshold.

Таблица 3. Процентное отклонение рассчитанных коэффициентов от критического порога

Table 3. Percentage deviation of calculated factors from the critical threshold

Коэффициенты	Процентное отклонение	Положение винта, градус						
		0	45	90	135	180	225	270
К2 (вертикаль)	%	–	–	–	3,78	193,7	157,6	119,1
К3 (вертикаль)	%	–	–	–	–	15,4	3,85	9,02
К3 (горизонт)	%	–	–	–	–	–	–	3,28

- при выборе плоскостей измерения и мест установки первичных преобразователей на объекте диагностики необходимо ориентироваться на параметры вибрации, которые требуются для расчета хотя бы одного из трех коэффициентов: К2 (вертикаль) и К3 (вертикаль, горизонт). Для определения К2 (вертикаль) следует измерять СКЗ виброскорости на лапе стойки подшипника и на фундаменте в вертикальных плоскостях. В случае К3 (вертикаль, горизонт) измерения СКЗ виброскорости необходимо проводить на верхней части крышки корпуса опорного подшипника и на фундаменте в вертикальных и горизонтальных плоскостях соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента и анализ полученных данных подтверждают, что методика, основанная на расчете коэффициентов по общим уровням вибрации, позволяет выявлять факт наличия дефектов креплений, возникающих из-за ослабления натяжения крепежного винта. Однако не все рассмотренные коэффициенты пригодны для решения этой задачи. Как показал эксперимент, только по коэффициентам К2 (вертикаль) и К3 (вертикаль, горизонт) можно обнаружить дефект, связанный с раскручиванием крепежного винта. Причем коэффициент К2 (вертикаль) продемонстрировал наибольшую эффективность, поскольку с его помощью можно достоверно определить наличие данного дефекта при самой минимальной степени ослабления затяжки крепежного винта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русов В.А. Вибрационная диагностика состояния фундаментов. В кн.: Состояние фундамента. Спектральная вибродиагностика. 2012.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: И.В. Буковский — провел основное исследование, собрал и проанализировал данные, ответственен за обработку и визуализацию данных, написал текст статьи; О.В. Хруцкий — участвовал в подготовке статьи к публикации, провел литературный обзор по существующим методам диагностики и выявления дефектов.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: I.V. Bukovsky, conducted the main research, collected and analyzed the data, is responsible for processing and visualizing the data, wrote the text of the article; O.V. Khrutsky, participated in preparing the article for publication, conducted a literature review of existing methods of diagnostics and detection of defects.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

REFERENCES

1. Rusov VA. Vibration diagnostics of the condition of foundations. In: *Condition of foundations. Spectral vibrodiagnostics*. 2012. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

***Илья Валерьевич Буковский**, аспирант, старший преподаватель кафедры судовой автоматики и измерений;
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3;
eLibrary SPIN: 4561-7543; e-mail: ilya.bukovskiy@mail.ru

Олег Валентинович Хруцкий, д-р техн. наук, профессор кафедры судовой автоматики и измерений;
e-mail: obx47@mail.ru

AUTHORS' INFO

***Ilya V. Bukovsky**, Postgraduate Student, Senior Lecturer at the Department of Marine Automation and Measurements;
address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia;
eLibrary SPIN: 4561-7543; e-mail: ilya.bukovskiy@mail.ru

Oleg V. Khrutsky, Dr. Sci. (Engineering), Professor at the Department of Marine Automation and Measurements;
e-mail: obx47@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 62-112.4

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_23

Научный обзор

Аналитический обзор распределителей четырехходовых для управления дистанционно-управляемыми клапанами на подводной лодке

В.Ш. Вахитов

Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

В настоящее время на проектах подводных лодок самую большую группу исполнительных органов составляют дистанционно-управляемые клапаны, управление которыми осуществляется с помощью распределителей с электромагнитным приводом. Сравнительный анализ помогает выбирать варианты развития и оценивать альтернативы применения технических средств в обеспечение управления дистанционно-управляемыми клапанами.

Цель обзора было проведение сравнительной оценки используемых на подводных лодках четырехходовых распределителей с электромагнитным приводом в качестве технических средств для управления дистанционно-управляемыми клапанами. Результаты сравнительного анализа показывают в общей сложности однотипность по конструктивным и техническим характеристикам, а также по принципу действия используемых в настоящее время распределителей, что является предпосылками к созданию нового типа распределителей, обладающих меньшими габаритами и улучшенными характеристиками, что позволит оптимизировать размещение оборудования в крайне насыщенных различными техническими средствами отсеках подводных лодок.

Ключевые слова: подводная лодка; распределители с электромагнитным приводом; управление; дистанционно-управляемые клапаны; принцип действия; основные характеристики.

Как цитировать

Вахитов В.Ш. Аналитический обзор распределителей четырехходовых для управления дистанционно-управляемыми клапанами на подводной лодке // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 23–31. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_23

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_23

Review

Analytical review of four-way directional valves used to control remote-controlled submarine valves

Vil Sh. Vakhitov

Saint Petersburg Marine Engineering Bureau «Malachite», Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

Today, in submarine projects, the largest group of actuators is remotely controlled valves, which are controlled by solenoid-controlled directional valves. Comparative analysis allows to select development options and evaluate alternative uses of devices to control remotely controlled valves.

The article aims to conduct a comparative analysis of four-way solenoid-controlled directional valves used on submarines as control devices of remotely controlled valves. The comparative analysis shows that state-of-the-art directional valves have uniform design, specifications, and the operating principle, which are prerequisites for the development of a new, more compact and advanced directional valve to improve equipment layout in submarine compartments with numerous devices.

Keywords: submarine; electromagnetically operated distributors; control; remote controlled valves; operating principle; main characteristics.

To cite this article

Vakhitov VSh. Analytical review of four-way directional valves used to control remote-controlled submarine valves. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):23–31. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_23

Received: 31.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 25.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

На подводной лодке (далее — ПЛ) применяется большое количество дистанционно-управляемых клапанов, предназначенных для установки в судовых системах в качестве запорного устройства. Учитывая замкнутый, ограниченный объем пространства, в системах используются клапаны с гидравлическими и пневматическими приводами.

Одним из основных элементов автоматизированных систем управления являются распределители пневматические и гидравлические с электромагнитными приводами. С их помощью осуществляется дистанционное и местное управление потоками рабочей среды, протекающими по трубопроводам, в которых установлены дистанционно-управляемые клапаны.

Существует большое многообразие распределителей с электромагнитными приводами, разрабатываемых и предлагаемых к применению различными предприятиями, специализирующимися на трубопроводной арматуре.

Распределители классифицируются:

а) по типу конструкции:

- трехходовые;
- четырехходовые.

б) по проводимой рабочей среде:

- пневматические;
- гидравлические.

в) по количеству электромагнитных приводов:

- с одним электромагнитным приводом;
- с двумя электромагнитными приводами.

В настоящей статье выполняется обзор основных технических характеристик распределителей четырехходовых

пневматических (гидравлических) с электромагнитными приводами, применяемых на проектах ПЛ АО «СПМБМ «Малахит».

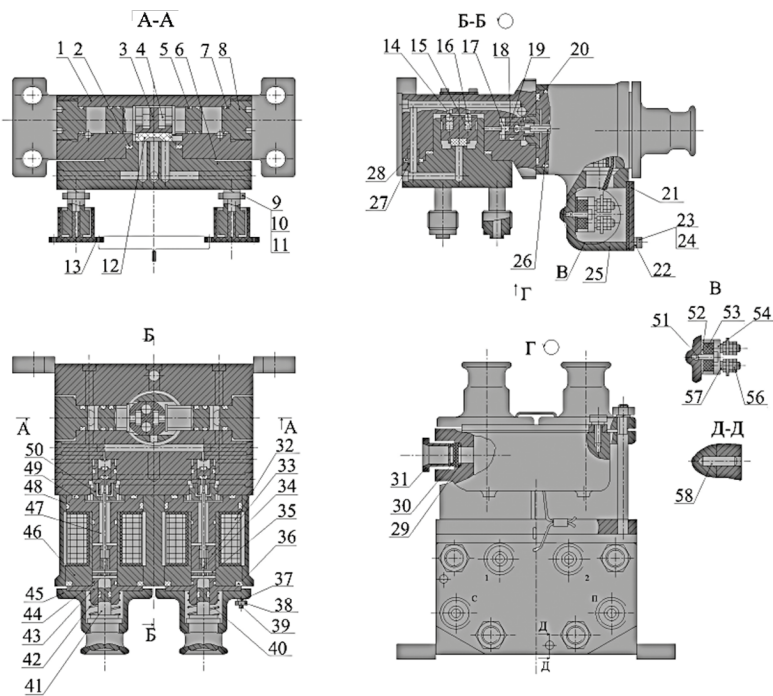
ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ ЧЕТЫРЕХХОДОВЫХ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПРИВОДАМИ

В настоящее время одними из ведущих поставщиков распределителей являются АО «ЗМС «Знамя труда», АО «НПФ «ЦКБА», АО «Аскольд», АО «ЦТСС» КБ «Армас» и др.

1. Распределители разработки АО «ЗМС «Знамя труда»

АО «ЗМС «Знамя труда» разрабатывает:

- клапаны распределительные четырехходовые пневматические Т055.096 и гидравлические Т055.096-04 с двумя электромагнитными приводами по ТУ302-07-465-91;
- распределители четырехходовые пневматические Т055.064 с одним электромагнитным приводом по ТУ26-07-198-78;
- клапаны распределительные четырехходовые пневматические Т055.098 с одним электромагнитным приводом по ТУ302-07-465-91;
- распределители четырехходовые пневматические Т055.048 и гидравлические Т055.048-04 с двумя электромагнитными приводами по ТУ26-07-198-78.



Поз.	Наименование	Поз.	Наименование
1	Корпус	32	Катушка
2	Прокладка	33	Якорь
3	Ползун	34	Винт
4	Поршень	35	Штифт
5	Кольцо	36	Кольцо
6	Крышка	37	Шайба
7	Кольцо	38	Гайка
8	Пробка	39	Шпилька
9	Шпилька	40	Пружина
10	Шайба	41	Толкатель
11	Гайка	42	Кольцо
12	Уплотнение	43	Втулка
13	Заглушка	44	Кольцо
14	Шарик	45	Крышка
15	Пружина	46	Магнитопровод
16	Опора	47	Стоп
17	Пружина	48	Кольцо
18	Золотник	49	Прокладка
19	Кольцо	50	Втулка
20	Седло	51	Винт
21	Крышка	52	Прокладка
22	Прокладка	53	Клеммная плата
23	Шайба	54	Клемма
24	Винт	55	Болт
25	Корпус электромагнита	56	Шайба
26	Шток	57	Гайка
27	Втулка	58	Штифт
28	Прокладка		
29	Шайба		
30	Уплотнение		
31	Втулка		

Рис. 1. Клапан распределительный Т055.096.
Fig. 1. Distribution valve T055.096.

1.1. Клапаны распределительные Т055.096 состоят из следующих основных узлов и деталей (рис. 1):

- 1) корпуса 1;
- 2) крышки поз. 6, присоединяющейся к напорной магистрали через штуцер «П», к приводу дистанционно-управляемого клапана через штуцера «1» и «2», сообщаемой со сбросом через штуцер «С»;
- 3) двух золотников поз. 18 с резиновым уплотнением, обеспечивающих герметичность затвора;
- 4) ползуна поз. 3, в который вставляется фторопластовое уплотнение поз. 12 для обеспечения герметичности;
- 5) двух поршней поз. 4 с резиновыми кольцами поз. 5, обеспечивающих перемещение ползуна 3 в крышке поз. 6;
- 6) корпуса электромагнитного привода поз. 25, предназначенного для размещения двух катушек поз. 32, общей клеммной платы поз. 53, сальника кабельного ввода, двух якорей поз. 33 и двух стопов поз. 47, двух крышек поз. 45, предназначенных для размещения кнопок (ручных дублеров);
- 7) двух кнопок, состоящих из толкателей поз. 41, пружины поз. 40, обеспечивающих ручное (местное) управление.

Основные характеристики клапанов распределительных¹:

- 1) условный проход DN: 6 мм;
- 2) рабочее давление: $(4,5 \pm 0,5)$ МПа;
- 3) рабочая среда: воздух с относительной влажностью (60 ± 3) % при температуре 35 °С;
- 4) температура рабочей среды: до +65 °С;
- 5) характеристики электромагнитного привода:
 - род тока: постоянный;
 - напряжение: $(27^{+1,35}_{-4,05})$ В;
 - номинальная потребляемая мощность: не более 25 Вт;
 - режим работы: импульсное включение продолжительностью не менее 2 с;
- 6) масса: 12,5 кг.

Принцип действия клапана распределительного показан на примере управления нормально-закрытым дистанционно-управляемым клапаном и заключается в следующем (рис. 2).

В исходном положении клапан «К» закрыт. При этом электромагниты «ЭМ-1» и «ЭМ-2» клапана распределительного «(P)» обесточены, золотники электромагнитов под действием пружин находятся в верхнем положении. Правая и левая полости клапана распределительного

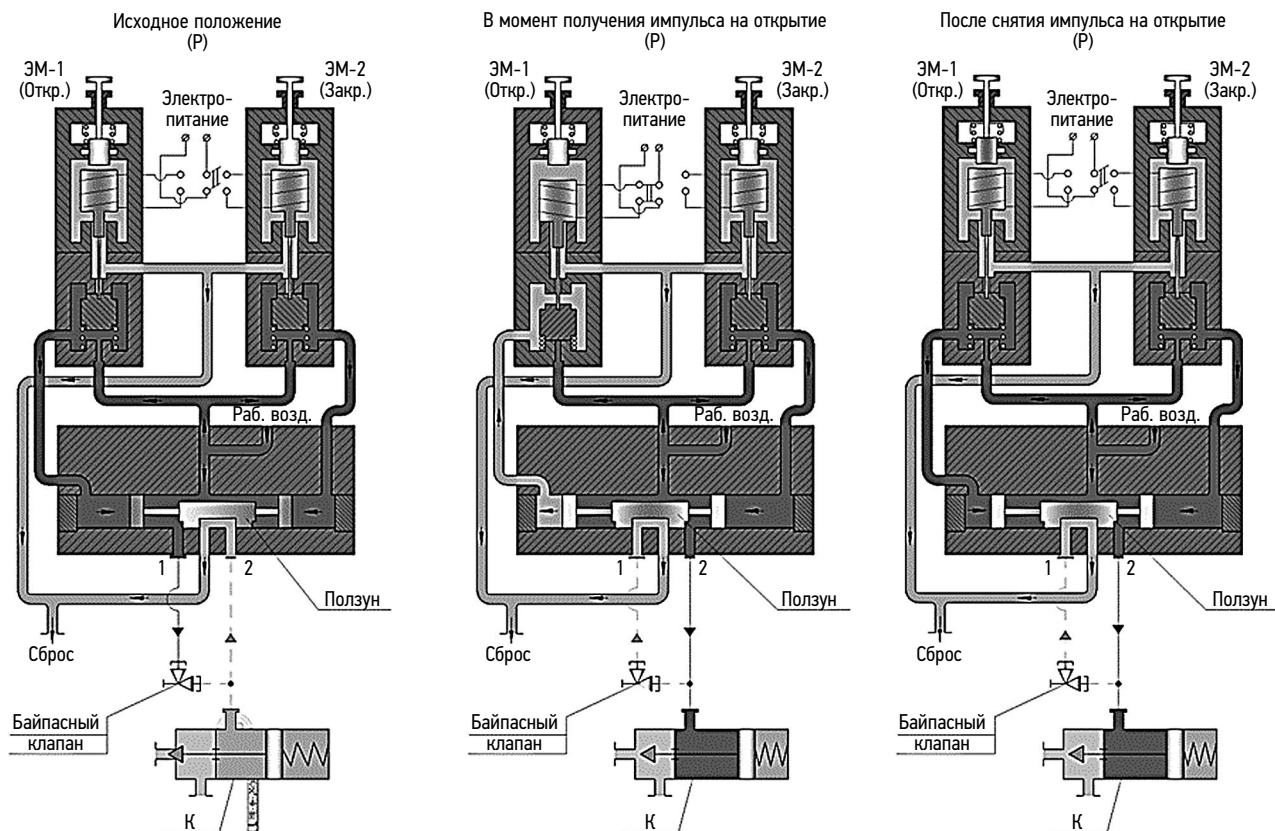


Рис. 2. Принцип действия клапанов распределительных Т055.096.

Fig. 2. Operating principle of distribution valves T055.096.

¹ АО ЗМС «Знамя труда». Клапан распределительный с электромагнитным приводом Дуб. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Т055.096ТО

«(P)» заполнены рабочим воздухом, ползун находится в крайнем правом положении. Полость открытия клапана «К» через штуцер «2», ползун и штуцер «С» соединена с атмосферой помещения.

Для открытия клапана «К» подается импульс напряжения от 2 до 5 с на электромагнит «ЭМ-1». Золотник электромагнита «ЭМ-1» переместится вниз и перекроет канал подачи воздуха в полость электромагнита, воздух из полости электромагнита и левой полости клапана распределительного «(P)» стравится в атмосферу помещения.

Ползун под действием рабочего давления воздуха в правой полости клапана распределительного «(P)» переместится влево, и через штуцер «2» в полость открытия клапана «К» поступит рабочий воздух, тем самым обеспечивая открытие клапана «К».

Через (2–5) с импульс на открытие с электромагнита «ЭМ-1» снимется. Золотник электромагнита «ЭМ-1» переместится в верхнее положение под действием пружины. В полость электромагнита «ЭМ-1» и левую полость клапана распределительного «(P)» поступит рабочий воздух, при этом ползун останется в том же положении.

1.2. Клапаны распределительные Т055.096-04 аналогичны по основным характеристикам, конструкции, принципу действия клапанам распределительным Т055.096 и предназначены для управления дистанционно-управляемыми клапанами с гидроприводом. Рабочей средой является вода питательная по ОСТВ5Р.4296, рабочее давление от 2,5 до 7,0 МПа.

1.3. Распределители Т055.064 состоят из следующих основных узлов и деталей (рис. 3):

- 1) корпуса поз. 9, через который проходит рабочая среда;
- 2) резинометаллических золотников поз. 8, 45, 68, обеспечивающих герметичность в затворе;
- 3) поршней поз. 5 и 65;
- 4) седел поз. 7, 43, 67;
- 5) мембран поз. 4, 64;
- 6) электромагнитного привода, обеспечивающего срабатывание распределителей, со встроенными кнопками.

Основные характеристики распределителей²:

- 1) условный проход DN: 6 мм;
- 2) рабочее давление: от 2,5 до 5,5 МПа;
- 3) рабочая среда: воздух с относительной влажностью (95±3) % при температуре 35 °С;
- 4) температура рабочей среды: до + 65 °С;
- 5) характеристики электромагнитного привода:
 - род тока: постоянный;
 - напряжение (24±1,2) В;
 - номинальная потребляемая мощность: не более 20 Вт;
 - режим работы: постоянная подача напряжения;
- 6) масса: 5,5 кг.

Принцип действия распределителей Т055.064 заключается в следующем (рис. 4).

При обесточенной катушке под давлением пружины золотник 1 находится в верхнем крайнем положении.

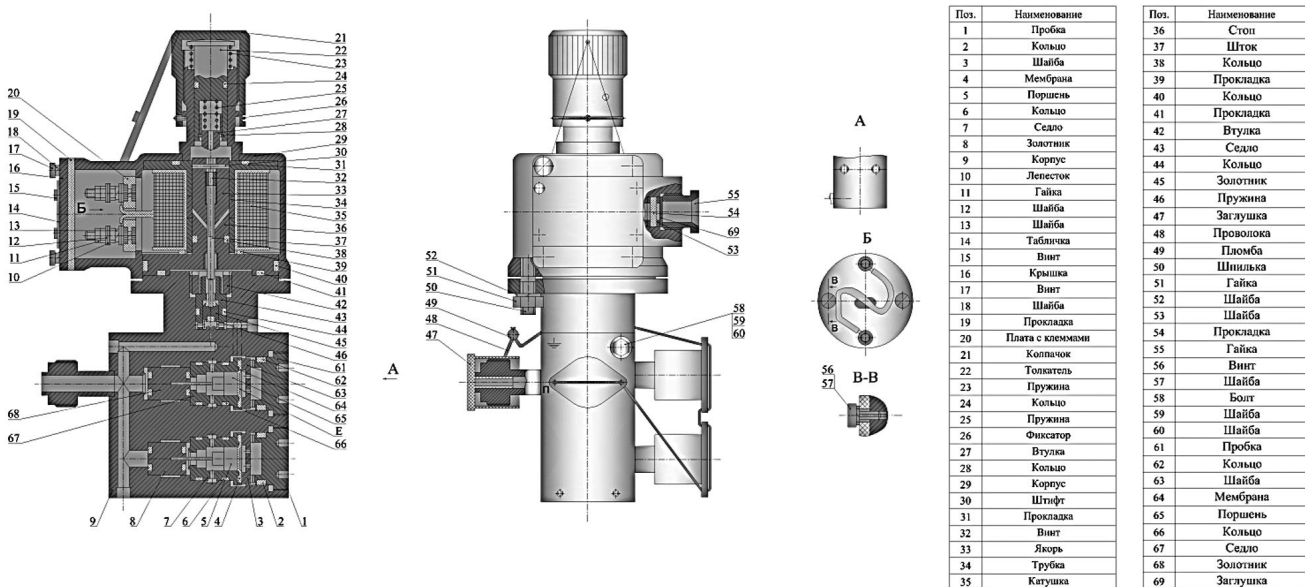


Рис. 3. Распределитель Т055.064.
Fig. 3. Distributor T055.064.

² АО ЗМС «Знамя труда». Распределитель пневматический с электромагнитным приводом Ду6, Рр от 2,5 до 5,5 МПа (от 25 до 55 кгс/см²), t до 65 °С. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Т055.064Т0.

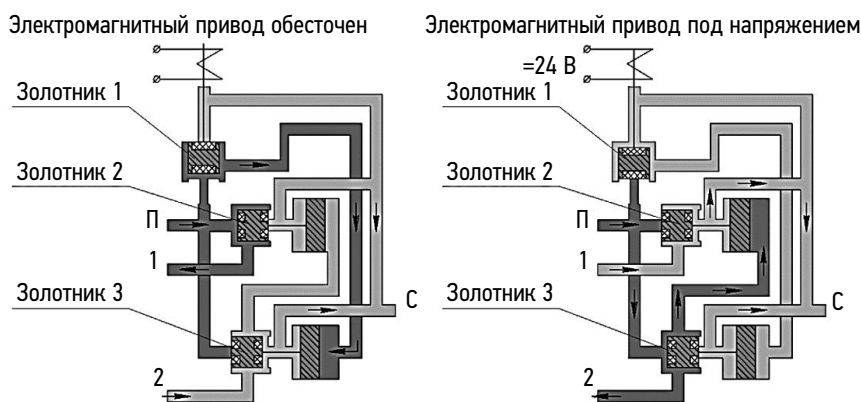


Рис. 4. Принцип действия распределителей Т055.064.

Fig. 4. Operating principle of distributors T055.064.

При подаче давления в штуцер «П» воздух перемещает золотник 2 в правое крайнее положение и далее поступает через штуцер «1» в пневмопривод. Одновременно воздух поступает на поршень, который перемещает золотник 3 в левое крайнее положение. Золотник 3 перекрывает проход воздуха в пневмопривод через штуцер «2».

При подаче напряжения на катушку, якорь, притягиваясь к стопу, действует через шток на золотник 1 и перемещает его в нижнее крайнее положение. Воздух перемещает золотник 3 в правое крайнее положение и проходит через штуцер «2» в пневмопривод. Одновременно воздух поступает на поршень, который перемещает золотник 2 в левое крайнее положение и перекрывает доступ воздуха в штуцер «1». При этом воздух из пневмопривода, соединенного со штуцером «1», сбрасывает через штуцер «С».

1.4. Клапаны распределительные Т055.098 по основным характеристикам, конструкции и принципу действия аналогичны распределителям Т055.064.

1.5. Распределители Т055.048, Т055.048-04 по основным характеристикам, конструкции и принципу действия аналогичны клапанам распределительным Т055.096, Т055.096-04.

2. Распределители разработки АО «НПФ «ЦКБА»

АО «НПФ «ЦКБА» разрабатывает:

- клапаны распределительные четырехходовые пневматические ЦКБТ055.096М и гидравлические ЦКБТ055.096М-04 с двумя электромагнитными приводами по ТУ3742-345-34390194-2013;
- клапаны распределительные четырехходовые пневматические ЦКБТ055.098М с одним электромагнитным приводом по ТУ3742-345-34390194-2013.

Клапаны распределительные по составу, основным техническим характеристикам и принципу действия идентичны распределителям, указанным в разделе 1.

3. Распределители разработки АО «Аскольд»

АО «Аскольд» разрабатывает манипуляторы четырехходовые двухпозиционные с электромагнитным приводом по ИПЛТ.494621.006ТУ.

Манипулятор состоит из основных узлов (рис. 5):

- два узла управления;
- два золотниковых узла;
- узел проточной части.

Узел управления состоит из корпуса электромагнита поз. 21, штока поз. 32, пружины поз. 33, катушки поз. 34, якоря поз. 35, кнопки ручного управления поз. 39 и предназначен для дистанционного и ручного управления манипулятором.

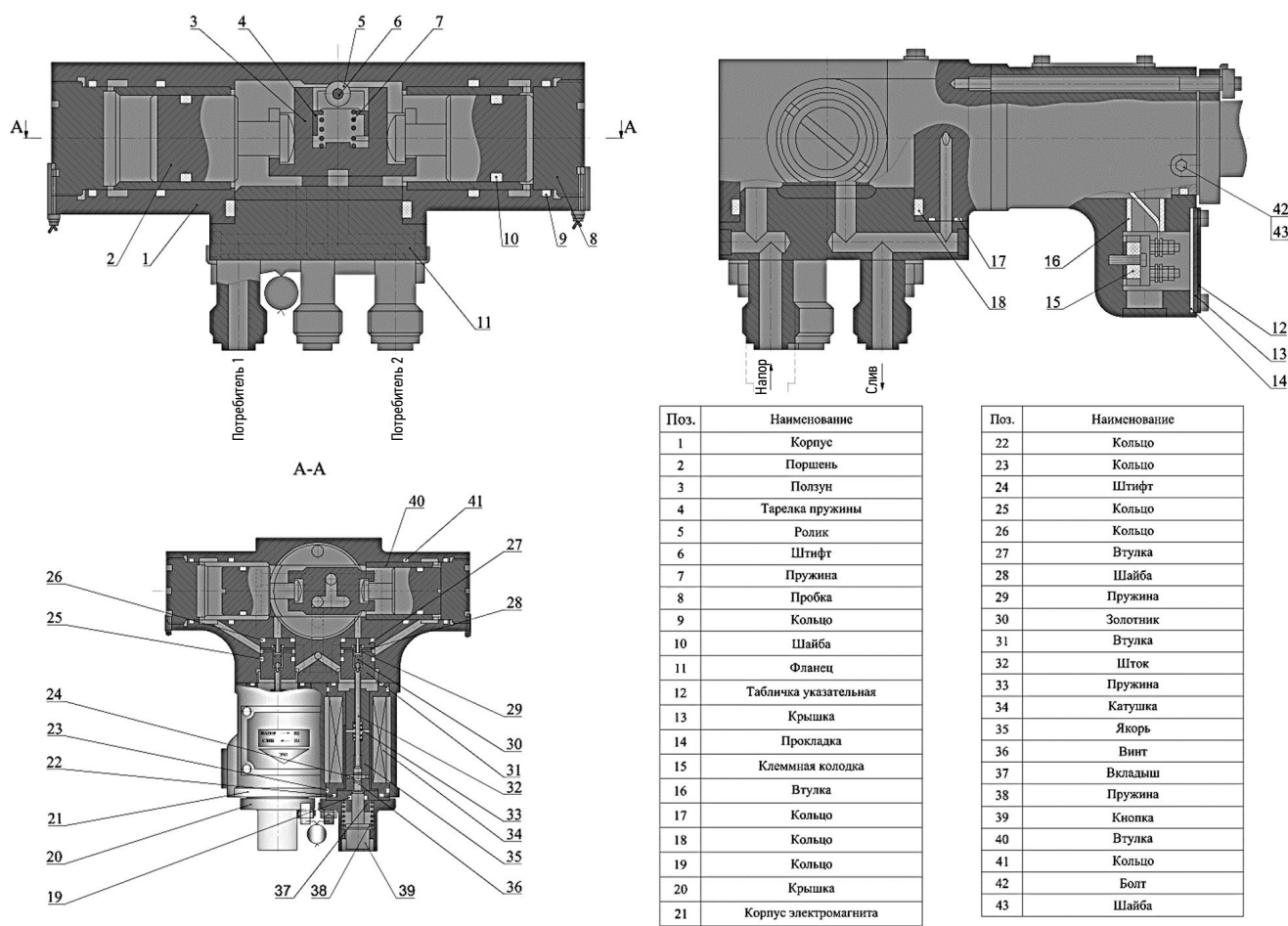
Золотниковый узел состоит из втулки поз. 27, пружины поз. 29, золотника поз. 30, втулки поз. 31 и предназначен для обеспечения рабочего перепада на поршнях.

Узел проточной части состоит из корпуса поз. 1, двух поршней поз. 2, ползуна поз. 3, пружины поз. 7, фланца поз. 11 и предназначен для передачи проводимой среды потребителям.

Основные характеристики манипуляторов³:

- 1) условный проход DN: 10 мм;
- 2) рабочее давление: (0,6–1,5) МПа;
- 3) рабочая среда: вода;
- 4) температура рабочей среды: до +90 °С;
- 5) характеристики электромагнитного привода:
 - род тока: постоянный;
 - напряжение: (27±2,7) В;
 - номинальная потребляемая мощность: не более 20 Вт;
 - режим работы: постоянная подача напряжения;
- 6) масса: 21 кг.

³ АО «Аскольд». Манипулятор четырехходовой штуцерный двухпозиционный с электромагнитным и ручным управлением из спецсплава. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ИПЛТ.494621.006ТО.



Поз.	Наименование
1	Корпус
2	Поршень
3	Ползун
4	Тарелка пружины
5	Ролик
6	Штифт
7	Пружина
8	Пробка
9	Кольцо
10	Шайба
11	Фланец
12	Табличка указательная
13	Крышка
14	Прокладка
15	Клемная колодка
16	Втулка
17	Кольцо
18	Кольцо
19	Кольцо
20	Крышка
21	Корпус электромагнита

Поз.	Наименование
22	Кольцо
23	Кольцо
24	Штифт
25	Кольцо
26	Кольцо
27	Втулка
28	Шайба
29	Пружина
30	Золотник
31	Втулка
32	Шток
33	Пружина
34	Катушка
35	Якорь
36	Винт
37	Вкладыш
38	Пружина
39	Кнопка
40	Втулка
41	Кольцо
42	Болт
43	Шайба

Рис. 5. Манипулятор ИПЛТ.494621.006.
Fig. 5. Manipulator IPLT.494621.006.

Принцип действия манипуляторов аналогичен распределителям, рассмотренным в разделе 1.

4. Распределители разработки АО «ЦТСС» КБ «Армас»

АО «ЦТСС» КБ «Армас» разрабатывает распределители четырехходовые пневматические с одним электромагнитным приводом и ручным управлением по ОСТ5Р.5571.

Распределители состоят из следующих основных узлов и деталей (рис. 6):

- проточной части;
- импульсной группы;
- электромагнита.

Проточная часть предназначена для непосредственного изменения потока воздуха и состоит из корпуса поз. 15 и 32, штока-поршней поз. 17 и 21, тарелок поз. 25, пружин поз. 24 и крышек поз. 23.

Импульсная группа поз. 41 предназначена для управления положением штока-поршня и тарелки путем

подачи или снятия давления на штоке-поршне и состоит из тарелок и седла.

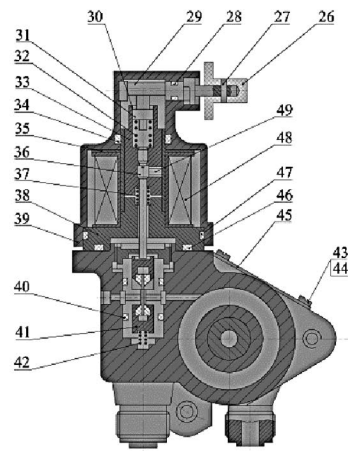
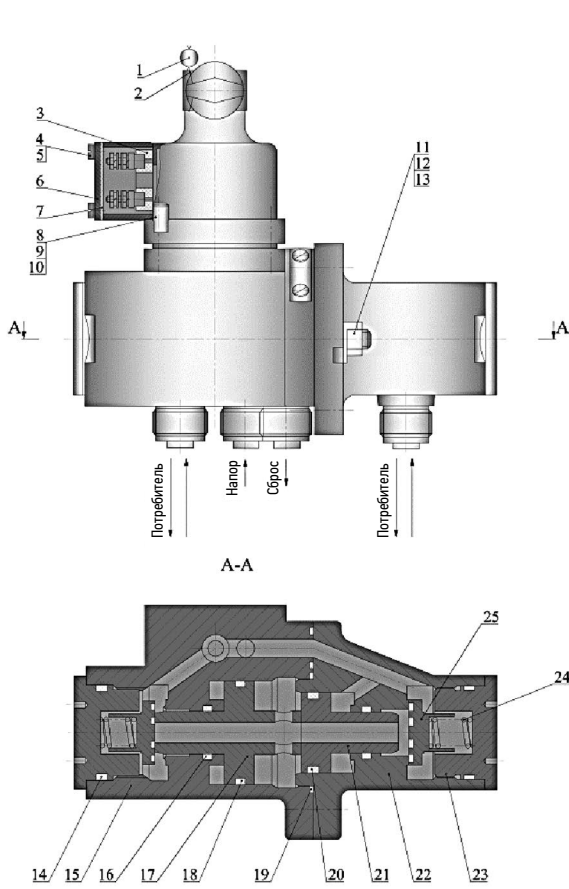
Электромагнитный привод предназначен для перемещения тарелок при подаче на него напряжения и состоит из корпуса электромагнита поз. 39, катушки поз. 48, сердечника поз. 38, якоря поз. 33, вала эксцентрикового поз. 29, ручки поз. 26 и пружин поз. 37 и 32.

Основные характеристики распределителей⁴:

- 1) условный проход DN: 10 мм;
- 2) рабочее давление: от 0,6 до 5,5 МПа;
- 3) рабочая среда: воздух;
- 4) характеристики электромагнитного привода:
 - род тока: постоянный;
 - напряжение: (24±1,2) В;
 - номинальная потребляемая мощность: не более 15 Вт;
 - режим работы: постоянная подача напряжения;
- 5) масса: 10,5 кг.

Принцип действия заключается в следующем (рис. 7).

⁴ АО ЦТСС КБ «Армас». Распределитель пневматический четырехходовой штуцерный с электромагнитным и ручным приводом DN10 Pp6...55PЭ. Руководство по эксплуатации. ИТШЛ.494611.014PЭ.



Поз.	Наименование
1	Пломба
2	Проволока
3	Плата
4	Винт
5	Шайба
6	Крышка
7	Прокладка
8	Гайка
9	Шайба
10	Шпилька
11	Гайка
12	Шайба
13	Шпилька
14	Кольцо
15	Основание корпуса
16	Кольцо
17	Шток-поршень
18	Кольцо
19	Кольцо
20	Кольцо
21	Шток-поршень
22	Основание корпуса
23	Крышка
24	Пружина
25	Тарелка

Поз.	Наименование
26	Ручка
27	Штифт
28	Кольцо
29	Вал эксцентриковый
30	Кольцо
31	Тарелка пружины
32	Пружина
33	Гайка
34	Кольцо
35	Пружина мембранная
36	Шток якоря
37	Пружина
38	Сердечник
39	Корпус электромагнита
40	Кольцо
41	Импульсная группа
42	Пружина
43	Планка отличительная
44	Винт
45	Втулка резьбовая
46	Кольцо
47	Кольцо
48	Катушка
49	Винт

Рис. 6. Распределитель ИТШЛ.494611.014.
Fig. 6. Distributor ITSHL.494611.014.

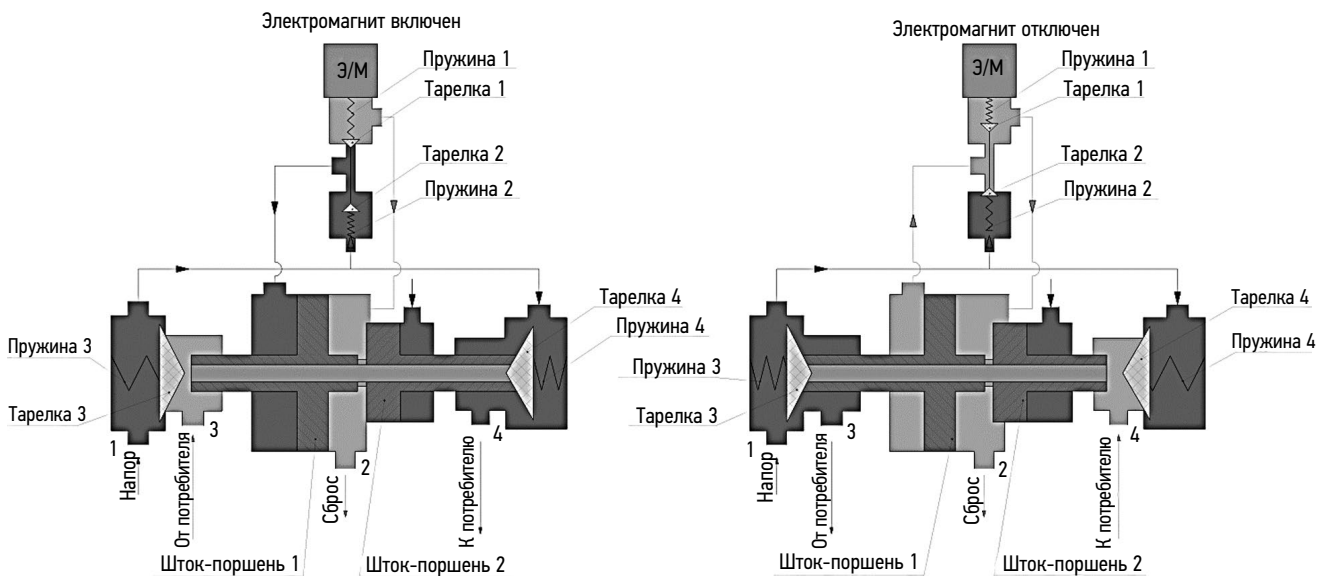


Рис. 7. Принцип действия распределителя ИТШЛ.494611.014.
Fig. 7. Operating principle of distributors ITSHL.494611.014.

Проводимая среда рабочего давления подается в штуцер 1. При отсутствии напряжения на электромагните среда попадает на тарелки 2, 3, 4 и в полость справа от штока-поршня 2. Тарелки 2, 4 под действием усилия пружин 2, 4 перекрывают проход в седле и в основании корпуса. Тарелка 4 одновременно открывает отверстие в штоке-поршне 2, сообщая тем самым потребитель (штуцер «4») со сбросом (штуцер «2»). В то же время проводимая среда, попадая на шток-поршень 2, смещает штоки-поршни 1, 2 и тарелку 3 влево, открывая тарелкой 3 отверстие в основании корпуса и перекрывая в штоке-поршне 1.

Таким образом, при отключенном электромагните проводимая среда из напора (штуцер «1») попадает к потребителю (штуцер «3»), а потребитель (штуцер «4») соединен со сбросом (штуцер «2»).

При подаче напряжения на электромагнит якорь, сжимая пружину 1, перемещается вниз и перемещает тарелки 1 и 2, перекрывая верхнее отверстие и открывая нижнее отверстие в седле. Проводимая среда под рабочим давлением попадает в полость слева от штока-поршня 1 и перемещает шток-поршни 1, 2 вправо, открывая тарелкой 4 отверстие в основании корпуса и перекрывая отверстие в штоке-поршне 2, сообщая тем самым потребителю (штуцер «4») с напором (штуцер «1»). В то же время тарелка 3 под действием усилия пружины 3 перекрывает отверстие корпуса и открывает отверстие в штоке-поршне 1, сообщая тем самым потребителю (штуцер «3») со сбросом (штуцер «2»).

Таким образом, при включенном электромагните проводимая среда из напора (штуцер «1») попадает к потребителю (штуцер «4»), а потребитель (штуцер «3») соединяется со сбросом (штуцер «2»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описаны некоторые типы четырехходовых распределителей, используемых на проектах ПЛ АО «СПМБМ «Малахит». Все применяемые распределители в общей сложности однотипны по конструкции, техническим характеристикам и принципу действия, что является предпосылкой к созданию нового типа распределителей для управления дистанционно-управляемыми клапанами.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The author declares that they have no competing interests.

ОБ АВТОРЕ

Виль Шамилевич Вахитов, инженер-конструктор 1-й категории; адрес: Россия, 196135, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, д. 18; e-mail: vakhitov_vil@mail.ru

AUTHOR INFO

Vil Sh. Vakhitov, design engineer, 1st category; address: 18 Frunze st, Saint Petersburg, 196135, Russia; e-mail: vakhitov_vil@mail.ru

УДК 621.882.085/.086.004

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_33

Оригинальное исследование

Проектирование современной 3D-технологии нарезания качественной резьбы в изделиях судостроительного производства

А.З. Курбанов, Н.М. Вагабов

Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Анализ результатов проведенных аналитических исследований позволил утверждать, что существующие технологии не обеспечивают нарезание качественных внутренних резьб в изделиях судостроительного производства, изготовленных из труднообрабатываемых материалов.

Цель — создать современную 3D-технология на основе конструирования прогрессивного резьбонарезного инструмента, в котором для обеспечения высокого качества нарезаемой резьбы необходимо разработать специальную схему резания с целью полного исключения трения боковых сторон зуба метчиковой части комбинированного инструмента зенкер-метчик с поверхностью нарезаемой резьбы, что обеспечит доступ в зону резания смазочно-охлаждающей жидкости, способствующей понижению температуры и смыванию с контактирующей части инструмента мелких частиц обрабатываемого материала, корящихся поверхности.

Методы. Для выполнения данной работы были применены методы эмпирического исследования: наблюдение, сравнение, измерение, эксперимент.

Результаты. Разработанная современная 3D-технология предоставила возможность автоматизировать процесс расчета основных параметров резьбонарезного инструмента и изготовления его в реальном производстве.

Выводы. Разработанная прогрессивная 3D-технология для создания современного процесса нарезания внутренних резьб в изделиях судостроительного производства, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, и испытание ее в реальных производственных условиях позволили повысить качество и производительность выпускаемой продукции и решить главный вопрос — автоматизировать процесс изготовления и импортозамещения.

Ключевые слова: программа; оборудование; судостроительное производство; 3D-технология; импортозамещение; качество; производительность; труднообрабатываемые материалы; моделирование; конструирование; схема резания; инструмент.

Как цитировать

Курбанов А.З., Вагабов Н.М. Проектирование современной 3D-технологии нарезания качественной резьбы в изделиях судостроительного производства // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 33–42. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_33

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_33

Original study article

Design of state-of-the-art 3D technology used to cut high-quality threads in shipbuilding products

Ali Z. Kurbanov, Nurulla M. Vagabov

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Review of analytical studies allowed us to conclude that existing technologies do not ensure cutting of high-quality internal threads in shipbuilding products made from difficult-to-machine materials.

AIM: A state-of-the-art 3D technology based on the design of an advanced thread-cutting tool is required to ensure high quality of the cut thread. Thus, it is necessary to develop a special cutting pattern to eliminate friction of tap side faces of the counter-sink tap with the surface of the cut thread. This will provide access of the cutting fluid to the cutting area allowing to lower the temperature and wash away small particles of the processed material warping the surfaces from the contact part of the tool.

METHODS: Empirical methods were used, including observation, comparison, measurement, and experiment.

RESULTS: The developed state-of-the-art 3D technology allowed for automating the calculation of the basic parameters for a thread-cutting tool and manufacture it in real-life production conditions.

CONCLUSIONS: The developed advanced 3D technology to create a state-of-the-art internal thread cutting process for shipbuilding products made of difficult-to-machine materials and testing it in real-life production conditions allowed to improve the quality and productivity of manufactured products and solve the main issue of import substitution.

Keywords: program; equipment; shipbuilding; 3D technology; import substitution; quality; productivity; hard-to-machine materials; modeling; design; cutting pattern; tool.

To cite this article

Kurbanov AZ, Vagabov NM. Design of state-of-the-art 3D technology used to cut high-quality threads in shipbuilding products. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):33–42. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_33

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 25.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Нарезание качественных резьбовых отверстий в деталях изделий судостроительного производства [1], изготовленных из труднообрабатываемых материалов, зависит от конструкции, геометрии и качества изготовления резьбонарезного инструмента. Очень важным является решение данной проблемы за счет создания прогрессивных 3D-технологий, обеспечивающих высокую производительность, основанную на создании современного станочного парка, высокопроизводительных инструментов, оснастки для решения вопроса импортозамещения, возникшего вследствие введения Евросоюзом и США тотальных санкций против Российской Федерации. Заметим, что отечественная станкостроительная промышленность с каждым годом увеличивает темпы выпуска и улучшает качество такого вида оборудования, это обеспечивает инструментальная промышленность [11, 13]. Большие резервы улучшения качества режущих инструментов и их работоспособности заложены в использовании быстрорежущих сталей и твердых сплавов новых марок, в использовании конструкций инструментов с оптимальной геометрией, комбинированных инструментов и т.д. Особенно этот вопрос остро стоит в производстве судостроительной промышленности для выпуска качественной, технологичной промышленной продукции. Для этого в первую очередь необходимо решить вопросы повышения надежности технологических операций механической обработки в ответственных деталях оборудования судостроения, изготовленных из труднообрабатываемых материалов [1–3]. Надежность технологической операции зависит от применяемого оборудования, режущих инструментов, режимов резания, знаний и мастерства исполнителя, материалов, применяемых для обработки [8, 13].

Из вышесказанного следует, что назрела необходимость создания прогрессивной 3D-технологии нарезания качественных внутренних резьб в изделиях судостроительного оборудования, изготовленных из труднообрабатываемых материалов [3, 6, 7, 9].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с тем, что существующая технология нарезания внутренних резьбовых отверстий в труднообрабатываемых материалах, из которых сделаны изделия судостроительного производства, не обеспечивает качественную, производительную работу, назрела необходимость разработать более совершенную, используя прогрессивную 3D-технология. Авторами разработана прогрессивная 3D-технология, основанная на применении комбинированного инструмента зенкер-метчика. Проведенные экспериментальные и производственные испытания комбинированного инструмента зенкер-метчика на реальном производстве для обработки резьбовых отверстий в деталях судостроительного производства,

изготовленных из труднообрабатываемых материалов, позволили установить эффективность выполняемой работы по качеству и производительности. Особенно актуален вопрос для автоматизации данного процесса.

МЕТОДЫ

При проведении исследований применены следующие методы:

- основные теоретические методы научного исследования: дедукция, аксиоматический, анализ;
- основные эмпирические методы научного исследования: наблюдение, эксперимент.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Длительные производственные наблюдения показывают, что несмотря на кажущуюся простоту автоматизации процессов резьбонарезания, получить ожидаемый эффект от этого процесса удается не всегда, особенно при обработке точных резьб в труднообрабатываемых материалах, из которых изготовлены многие детали изделий судостроения, производящиеся предприятием «АО завод им. М. Гаджиева» (рис. 1). Иногда после обработки на высокопроизводительном автоматизированном станке осуществляется ручная калибровка резьбы, так как без этого не удается выполнить качественное резьбовое отверстие, или очень часты поломки метчиков при однопроходном резьбонарезании.

Факторами, снижающими работоспособность метчиков, в основном являются:

- 1) выкрашивание режущих кромок на заборном конусе метчика;
- 2) поломки метчиков (в особенности малых размеров до 18 мм);
- 3) несоблюдение размеров и технических требований, предъявляемых к резьбе в детали.

Если при работе на обычном однопозиционном оборудовании можно было мириться с неудовлетворительной работоспособностью метчиков и находить практические решения для обеспечения нормального протекания технологического процесса, то при работе на агрегатных и автоматизированных станках такая возможность в большинстве случаев отсутствует, так как:

1. При работе машинным метчиком на однопозиционном оборудовании (например, на сверлильном станке) рабочий немедленно замечает любое отклонение процесса и прекращает работу для принятия каких-либо мер. При работе на агрегатном или автоматическом станке в условиях многостаночного обслуживания или пультового управления такая возможность в большинстве случаев отсутствует.

2. Нарезание точных резьб при работе на обычном оборудовании осуществляется в основном комплектом метчиков, причем последний чистовой проход обычно выполняется вручную. Такое решение для автоматизированного оборудования неприемлемо.

3. В связи с неудовлетворительной работоспособностью метчиков простой однопозиционного оборудования велики. При работе на агрегатных станках и автоматических линиях эти простои возрастают многократно, так как при выходе из строя любого элемента, в том числе и метчика, почти всегда необходимо остановить весь агрегат.

Несмотря на значительное количество и разнообразие исследований работы метчиков, теоретическая разработка ряда вопросов проводилась недостаточно. Имеющиеся в литературе статистические данные по эксплуатации машинных метчиков [12–14] говорят о том, что вопросы стойкости машинных метчиков при их нормальном износе не могут полностью характеризовать их работоспособность.

Для обеспечения высокого качества резьбовых отверстий и повышения стойкости комбинированного инструмента нами разработана на метчиковой части специальная схема резания [4, 5, 8, 11], которая позволяет устранить недостатки известных технологий, заключающиеся в том, что работа метчиков, в силу специфики резбонарезания в труднообрабатываемых материалах, протекает в очень трудных условиях: одновременное участие в процессе большого количества режущих кромок, значительная площадь контакта инструмента с обрабатываемым материалом, как в зоне резания,

так и по боковым поверхностям, затрудненный доступ смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), чрезмерные силовые и температурные нагрузки. Все это способствует интенсивному износу, а также вызывает защемление режущих зубьев во впадинах резьбы, что приводит к поломке метчиков. В предлагаемой конструкции [4, 14] обеспечен зазор на боковых поверхностях зубьев метчиковой части комбинированного инструмента за счет несимметричности половины углов профиля зуба $\epsilon_1 = 27^\circ 30'$ и $\epsilon_2 = 27^\circ 22'$ для М14 с шагом $P = 2,00$ мм. Данная конструкция способствует доступу в зону обработки СОЖ, которая подается под большим давлением, обеспечивая тем самым смывание мелких частиц обрабатываемого материала, что предотвращает выкрашивание, защемление и коробление поверхностей зубьев.

Результаты статистических исследований стойкости метчиков на предприятии «АО завод им. М. Гаджиева» [1] позволили нам прийти к выводу о том, что опыты на стойкость большинства типов метчиков дают одностороннюю кривую распределения, когда мода, т. е. наиболее вероятная их стойкость, расположена в зоне стойкостей инструмента $T_{\min} \rightarrow 0$. Это указывает на наличие значительного количества ненормальностей (поломок, выкрашивания режущих кромок, задиров, потерь размера и др.), резко снижающих стойкость метчиков.



Рис. 1. Изделия судостроительного производства, выпускаемые на предприятии «АО завод им. М. Гаджиева». Иллюстрация с сайта предприятия «АО завод им. М. Гаджиева».

Fig. 1. Shipbuilding products manufactured by M. Gadzhiev Plant JSC.

Из перечисленного комплекса наиболее полно и глубоко изучена стойкость машинных метчиков при нормальном их износе. Изучение же остальных перечисленных выше факторов систематически не осуществлялось и носит в основном случайный характер. Поэтому в литературе не приводится ни методики исследования этих явлений, ни глубокого анализа причин, вызывающих их. Особенно проблемным является выкрашивание режущих кромок метчиков.

Вопросами выкрашивания режущих кромок инструментов начали заниматься сравнительно недавно. При выкрашивании режущих кромок во время стойкостных испытаний ограничиваются замечаниями о ненормальном износе инструмента. Это относится не только к метчикам, но и ко всем видам режущих инструментов.

Нами рассмотрены вопросы прочности режущих кромок подобных инструментов в следующих работах [6–8]. В них приняты три основные расчетные схемы нагружения режущих кромок при резании металла. Расчетные схемы нагружения несколько идеализированы, так как не учитывалась кинематика резания.

Для рассмотрения метчиков, работающих с большими осевыми подачами (равными шагу), такие схемы могли бы дать значительную погрешность. В указанных схемах рассматривается выкрашивание как результат действия сил резания на переднюю поверхность инструмента. При работе метчика в большинстве случаев причиной выкрашивания являются совершенно иные силы. Однако выводы, к которым пришли при изучении прочности режущих кромок, являются достаточно общими и могут быть использованы и при рассмотрении выкрашиваний метчиков. Главные из них следующие:

1. При температуре 20 °С и прочих равных условиях прочность режущих кромок инструментов, изготовленных из инструментальной стали разных марок, характеризуется величинами: для стали Р9 $\sigma_T = 158 \text{ кг/мм}^2$ (1580 Мн/м²); для стали Р18 $\sigma_T = 130 \text{ кг/мм}^2$ (1300 Мн/м²); для стали ХВГ $\sigma_T = 95 \text{ кг/мм}^2$ (950 Мн/м²); для стали У12А $\sigma_T = 94 \text{ кг/мм}^2$ (940 Мн/м²). Из указанного ряда материалов для машинных метчиков употребляются стали Р18 и Р9, что оправдано длительным опытом эксплуатации, причем сталь Р18 применяется значительно чаще. Повышенная прочность стали Р9 по сравнению со сталью Р18 (примерно на 21 %), как показывает опыт работы, не является достаточным обоснованием для использования стали Р9 вместо стали Р18, так как сталь Р9 склонна к образованию трещин при шлифовании профиля резьбы.

2. Температура до 500 °С не оказывает заметного влияния на прочность стали Р18. По данным исследований [4, 14], при работе метчиками, даже при скоростях до 30–35 м/мин, температура режущих кромок не превышает 400 °С. Тем более она не будет достигать 400 °С при скоростях, применяемых на агрегатных и автоматизированных станках ($v = 6 \div 18$ м/мин). Следовательно, при исследовании прочности метчиков температурным фактором можно пренебречь.

3. Поверхность скалывания режущих кромок располагается перпендикулярно к поверхности, которая подвержена нагружению к передней поверхности. Несмотря на то, что основной причиной выкрашивания метчиков не являются силы, действующие на переднюю поверхность, скалывание кромок метчиков происходит аналогично.

Выкрашивание режущих кромок заборного конуса метчика в основном наблюдается при нарезании резьбы в глухих отверстиях [5, 10]. Наблюдения авторов показывают, что это явление встречается и при нарезании резьбы в сквозных отверстиях при условии, что резьбу режут не «напроход», т.е. когда заборный конус метчика не выходит с противоположной стороны отверстия. Причиной выкрашивания считается схватывание передней поверхности метчика с корнем стружки при перемене хода метчика [10]. Такая точка зрения неправильна.

Указание о возможности выкрашиваний режущих кромок в результате попадания стружек под затылочную поверхность метчика при вывертывании имеется в работах [7, 9, 14, 15]. Авторы этих работ не занимались детальным анализом данного явления и не предлагают надежных способов устранения выкрашиваний.

В настоящей работе решение вопроса о выкрашивании предлагается осуществлять путем нахождения и создания форм затылочных кривых, которые не допускали бы возможности попадания стружек между затылочной и обрабатываемой поверхностью.

Под затылочной кривой понимают плоскую кривую, представляющую след от пересечения затылочной поверхности заборного конуса метчика с плоскостью, перпендикулярной оси метчика. Следовательно, форма затылочной поверхности характеризуется формой затылочной кривой. Изучение форм затылочных кривых заборного конуса метчика представляет интерес во многих отношениях. При разных формах затылочных кривых вероятность попадания стружек под затылочную поверхность заборного конуса метчика различна. Следовательно, метчики, затылованные разными способами, будут иметь и разную сопротивляемость выкрашиванию. Форма затылочной кривой характеризует геометрию режущей кромки метчика, обеспечивая те или иные величины задних углов заборного конуса.

В литературе описано до десяти видов различных приспособлений и станков для затылования заборных конусов метчиков, причем каждый тип приспособления обеспечивает определенную форму затылочной кривой, отличную от других видов. При этом каких-либо убедительных обоснований для применения того или иного способа затылования не имеется. Отсутствуют также расчетные формулы для определения величин задних углов $\alpha_{\text{ст}}$ и величин падений затылков $K_{\text{ст}}$ при том или ином способе затылования в зависимости от параметров настройки приспособлений.

Расчет величины заднего угла по известному значению $K_{\text{ст}}$ не представляется возможным, так как зависимость

$\alpha_{\text{CT}} = f(K_{\text{CT}})$ для каждого типа затылочной кривой не получена. Надежных способов измерения углов α_{CT} также не имеется. Ряд исследователей [14] и др., чтобы получить возможность определения фактических величин α_{CT} , вынуждены были разрезать метчик и просматривать срез под микроскопом или проектором, но этот способ не может считаться удовлетворительным.

В большинстве работ задние углы и величины падения затылков на заборном конусе метчиков рассматриваются в статическом состоянии инструмента. В то же время известно, что эти величины в работе значительно изменяются. Особенно это касается метчиков, так как этот инструмент работает с большими подачами на оборот (равными шагу резьбы) и влияние осевого перемещения на величины углов и величины падений затылков велико.

Разработанная нами 3D-технология позволяет устранить недостатки известных технологий, заключающиеся в том, что работа метчиков, в силу специфики резьбонарезания в труднообрабатываемых материалах, протекает в очень трудных условиях: участие в процессе одновременно большого количества режущих кромок, значительная площадь контакта инструмента с обрабатываемым материалом, как в зоне резания, так и по боковым поверхностям, затрудненный доступ СОЖ, чрезмерные

силовые и температурные нагрузки. Все это способствует интенсивному износу, а также вызывает защемление режущих зубьев во впадинах резьбы, что приводит к поломке метчиков. Одной из задач настоящей работы является установление причин и изыскание способов ликвидации поломок метчиков.

Из всех видов режущего инструмента машинные метчики при эксплуатации имеют наиболее высокий процент поломок. Это объясняется тем, что работа машинных метчиков имеет свою специфику, с одной стороны, прочность метчиков не может быть увеличена сколько-нибудь ощутимо, так как диаметр метчика увеличен быть не может, с другой стороны, нагрузки, которые воспринимает метчик, не могут быть снижены значительно, так как осевая подача метчика на оборот не может быть уменьшена. Именно эти условия чрезвычайно усложняют решение вопроса ликвидации поломок машинных метчиков.

С течением времени борьба с поломками метчиков усложняется в связи с появлением все более прочных сталей и сплавов, при обработке которых силы во много раз больше, чем при обработке обычных машиностроительных материалов. Прочность же инструментальных сталей за последние 20–30 лет не изменилась. В основном все исследовательские работы направлены

Таблица 1. Основные параметры расчета комбинированного инструмента зенкер-метчик

Table 1. Basic parameters for calculating a countersink tap

Параметры метчика	Параметры зенкера	Справочные размеры
Наружный диаметр $d_m = 14,73$ мм	Наружный диаметр $d_z = 12,0$ мм	Оптимальный диаметр проволок $R1 = 1,910$ мм
Допуск диаметра $\delta_{dm}(0,6) = -0,105$ мм	Допуск диаметра $(0,1) = 0,39$ мм	Длина передней фаски $F1 = 10$ мм
Стандартный средний диаметр $d_{m2} = 12,752$ мм	Величина затылования $h_z = 0,7$ мм	Длина задней фаски $F2 = 10$ мм
Корректированный средний диаметр $d_{m2}^n = 12,769$ мм	Размер для справок $d_{z2} = 11,3$ мм	Величина перекрытия $C = 0,5$ мм
Допуск диаметра $d_m(2,04) = -0,034$ мм	Припуск на зенкерование $t_z = 0,4$ мм	Размер $M1y$ конца конуса $M1 = 15,560$ мм
Внутренний диаметр $d_{m1} = 11,725$ мм	Длина режущей части $l_{z0} = 0,8$ мм	Ширина фрезы для канавки $S = 11,0$ мм
Ширина пера $P1 = 4,5$ мм	Длина рабочей части $l_{z1} = 10$ мм	Глубина канавки $RZ = 4,4$ мм
Величина затылования $h_m = 1,6$ мм	Общая длина зенкера $l_{z2} = 20$ мм	
Диаметр сердцевин $d_{m3} = 5,7$ мм	Диаметр хвостовика $d_{z3} = 11,2$ мм	
Угол заборного конуса $\varphi_1 = 3^\circ$	Диаметр сердцевин $d_{z4} = 6,0$ мм	
Угол обратного конуса $Q_5 = 0^\circ 20'$	Ширина ленточки $f_z = 0,7$ мм	
Угол профиля $\varepsilon_1 = 27^\circ 30'$	Диаметр сверла $d_{\text{CB}} = 11,2$ мм	
Угол профиля $\varepsilon_2 = 27^\circ 22'$		
Число режущих зубьев $z = 31$		
Длина заборной части $l_{m0} = 20,731$ мм		
Длина конической части $l_{m1} = 24$ мм		
Диаметр хвостовика $d_{m4} = 11$ мм		
Длина хвостовика $l_{m2} = 70$ мм		
Размер квадрата $h_{\text{KB}} = 9$ мм		
Длина квадрата $l_{m4} = 13$ мм		
Диаметр шейки $d_{m5} = 9$ мм		
Общая длина инструмента $l_{m5} = 110$ мм		
Длина до стыка $l_{m6} = 54$ мм		

на улучшение стойкостных характеристик инструментальных сталей, а не их прочностных характеристик. Несмотря на большую актуальность вопросов, связанных с ликвидацией поломок метчиков, они изучены недостаточно. В какой-то степени данный вопрос решен нами в процессе проведенных исследований на предприятии «АО завод им. М. Гаджиева», а именно в предлагаемой конструкции [1] (Авторское свидетельство № 1618535/08.09.1990. Курбанов А.З., Абдуллаев А.В. Метчик для обработки труднообрабатываемых материалов) обеспечен зазор на боковых поверхностях зубьев метчиковой части комбинированного инструмента за счет неравенства половины углов профиля зуба $\epsilon_1 = 27^\circ 30'$ и $\epsilon_2 = 27^\circ 22'$ для М14 с шагом $P = 2,00$ мм. Данная конструкция способствует доступу в зону обработки СОЖ, которая подается под большим давлением, обеспечивая тем самым смывание мелких частиц обрабатываемого материала, что предотвращает выкрашивание, защемление и коробление поверхностей зубьев.

Поэтому вопрос проектирования и создания комбинированного инструмента путем разработки 3D-технологии является очень актуальным [12, 15].

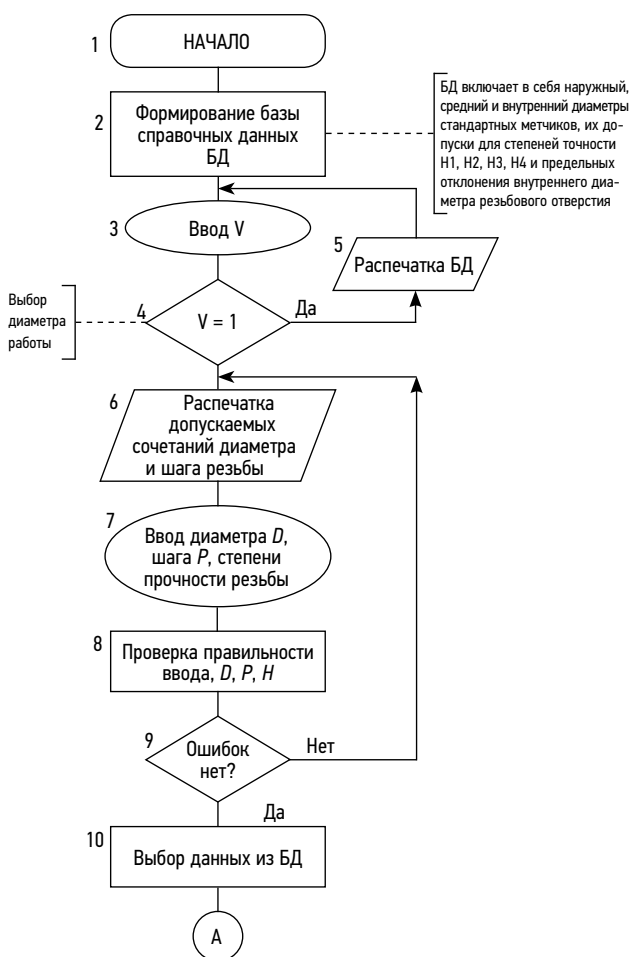


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета комбинированного инструмента зенкер-метчик. БД — база данных; D — диаметр; P — шаг резьбы; H — степень прочности.
Fig. 2. Calculation algorithm flow chart for the countersink tap.

При создании 3D-модели комбинированного инструмента зенкер-метчика важнейшим этапом в процессе является создание модели объекта, максимально приближенной по своим параметрам к параметрам объекта, которое носит название трехмерное моделирование [8]. Для создания 3D-модели (монокристаллическая модель) комбинированного инструмента зенкер-метчика была разработана блок-схема расчета параметров и блок-схема алгоритма с заданной программой, а для изготовления в производственных условиях разработан код и программа для модели. Для примера на основании использования блок-схемы расчета (рис. 2) и блок-схемы алгоритма с заданной программой (рис. 3) провели расчет параметров метчика для нарезания резьбы М14 с шагом $P = 2,00$ мм, результаты которого представлены в табл. 1.

На основании вышеприведенных расчетов, применив прогрессивную 3D-технологии, можно получить модель, которая в дальнейшем может быть использована на производстве для изготовления комбинированного инструмента зенкер-метчик (рис. 4).

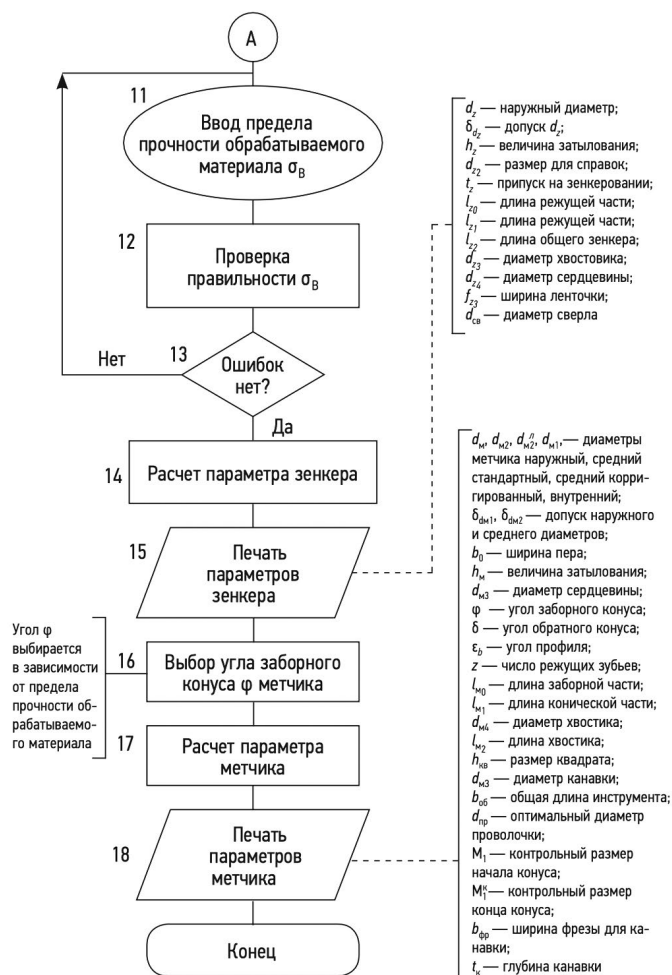


Рис. 3. Блок-схема расчета алгоритма с заданной программой.
Fig. 3. Programmed calculation algorithm flow chart.

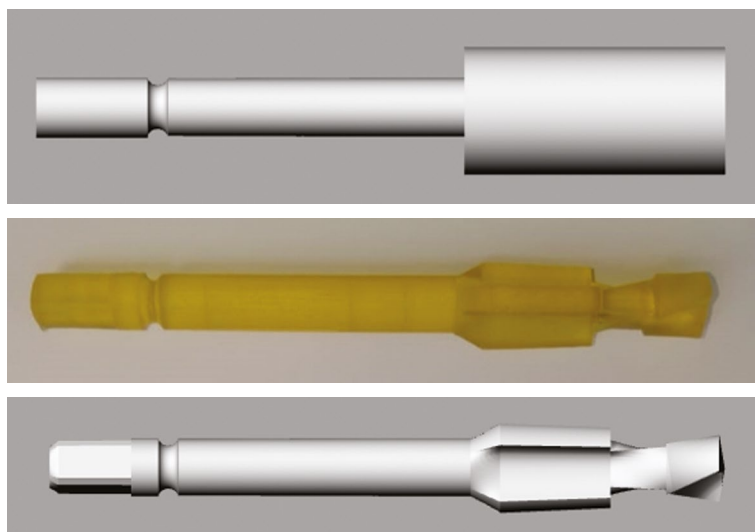


Рис. 4. 3D-модель для изготовления комбинированного инструмента зенкер-метчик.
Fig. 4. 3D manufacturing model of a countersink tap.

В дальнейшем по итогам смоделированного зенкер-метчика в 3D-программе был создан необходимый программный код для его прототипирования, конечным результатом которого стала напечатанная модель (рис. 5) [4, 6, 7, 9].

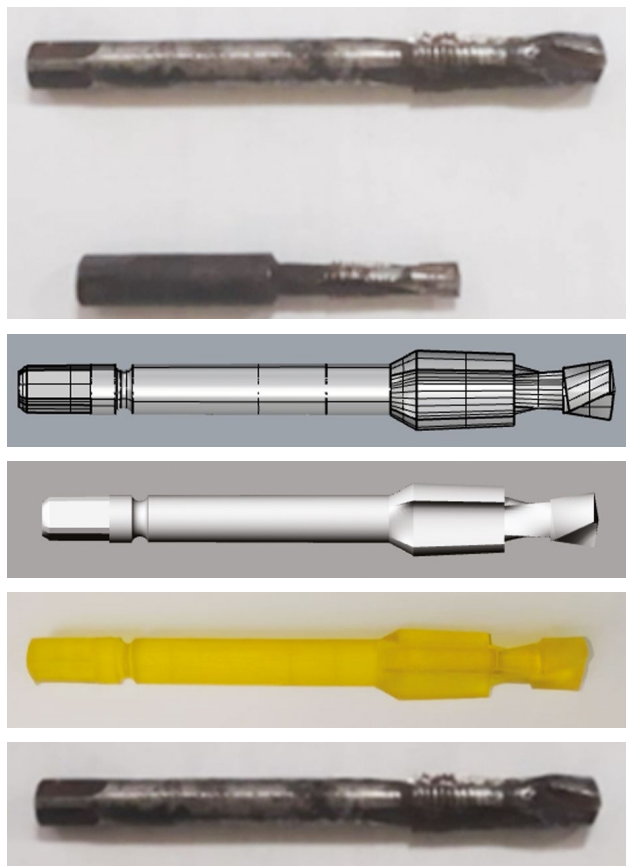


Рис. 5. Совокупный результат модернизированного производства
Fig. 5. Final result of the redesigned process

ВЫВОДЫ

1. Применение современной 3D-технологии для проектирования и создания комбинированного инструмента зенкер-метчика позволило механизировать и автоматизировать процесс расчета его параметров на основании применения блок-схемы расчета и блок-схемы расчета алгоритма с заданной программой.
2. Разработка кода для формирования модели позволила модернизировать процесс его создания для нарезания резьбы в деталях изделий судостроительного производства, изготовленных из труднообрабатываемых материалов.
3. Проведенные аналитические исследования показали эффективность разработанной 3D-модели для обработки резьбовых отверстий в изделиях судостроительного производства, изготовленных из труднообрабатываемых материалов.
4. Дальнейшие экспериментальные исследования в реальных производствах, результаты которых будут опубликованы в следующих статьях, должны доказать преимущество разработанной 3D-технологии.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Оригинальность. При создании настоящей работы были использованы фрагменты собственного текста, опубликованного ранее (Вагабов Н.М., Курбанов А.З., Магомедова М.А. Проектирование и расчет комбинированного инструмента зенкер-метчик для обработки деталей судовых машин, механизмов и судовой арматуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(2):8-17. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-8-17, распространяется на условиях лицензии CC-BY 4.0).

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку

статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: А.З. Курбанов — обладатель авторского свидетельства на комбинированный инструмент зенкер-метчик, Победитель Гранта Главы Республики Дагестан (тема посвящена разработке, проектированию и созданию современной 3D-технологии нарезания резьбы в труднообрабатываемых материалах, и эти исследования являются основой создания и написания статьи), принял активное участие в подготовке и оформлении статьи; Н.М. Вагабов — принял активное участие в подготовке и оформлении статьи, разработке схем и рисунков.

Источник финансирования. Источником финансирования исследований являются средства победителя конкурса Гранта Главы Республики Дагестан в области образования, науки, техники и инноваций в 2022 году (Проект выполнен в период с 10.01.2023 по 25.12.2023).

Благодарность. Выражаем благодарность за оказание содействия при выполнении Грантовой работы Министру образования и науки Республики Дагестан Бучаеву Яхье Гамидовичу и генеральному директору завода «АО завод им. М. Гаджиева» Папалашову Абдулвагабу Яхьяевичу.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Statement of originality. When creating this work, fragments of his own text published earlier were used (Vagabov N.M., Kurbanov A.Z., Magomedova M.A. Combined countersink-tap

tool for the processing of parts of ship machines, mechanisms and fittings: design and calculations. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2018;45(2):8-17. (In Russ.) doi: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-8-17).

Authors' contributions. All authors made substantial contributions to the conception, conduct of the study and preparation of the paper, read and approved the final version before publication. Personal contribution of each author: A.Z. Kurbanov, Holder of the author's certificate for the combined countersink gauge tool, Winner of the RD Chapter Grant (the topic is devoted to the development, design and creation of modern 3D-thread cutting technology in difficult-to-process materials and these studies are the basis for creating and writing an article), took an active part in the preparation of the article, took part in the design of the article; N.M. Vagabov, took an active part in the preparation of the article, development of diagrams and drawings, took part in the design of the article.

Funding source. The source of research funding is the funds of the winner of the Grant competition of the Head of the Republic of Dagestan in the field of education, science, technology and innovation in 2022 (The project was completed in the period from 01/10/2023 to 12/25/2023).

Gratitude. We express our gratitude for the assistance in the implementation of the grant work to the Minister of Education and Science of the Republic of Dagestan Buchaev Yahya Hamidovich and the general director of the plant "JSC Plant named after M. Gadzhiev" Papalashov Abdulvagab Yakhyevich.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1618535/08.09.1990. Курбанов А.З., Абдуллаев А.В. Метчик для обработки труднообрабатываемых материалов.
2. Мацкевич В.Д., Гармашев А.Д. Судостроительные материалы: Учебное пособие. Ленинград: ЛКИ, 1983. 94 с.
3. Абасов И. Основы трехмерного моделирования в 3dsMax: Учебное пособие. Москва: ДМК Пресс, 2009.
4. Гуревич Я.Л., Горохов М.В., Захаров В.И., и др. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / изд. перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1986. 240 с.
5. Стиренко А.С. 3dsMax 2009/ 3dsMaxDesign 2009. Самоучитель. Москва: ДМК Пресс, 2013.
6. Попилов Л.Я. Новые материалы в судостроении: В 4-х ч. Ленинград: Судостроение, 1966–1974. 365 с.
7. Петрухин П.Г. Резание труднообрабатываемых материалов. Москва: Машиностроение, 1980. 230 с.
8. Подураев В.Н. Обработка резанием жаропрочных и нержавеющей материалов. Москва: Высшая школа, 2005. 245 с.
9. Сахно К.Н. Проектирование сложных судовых трубопроводных систем с учетом погрешностей их изготовления. Астрахань: Издательство АГТУ, 2008. 83 с.
10. Баранчиков В.И., Жариков А.И., Юдина Н.Д., и др. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / под ред. В.И. Баранчикова. Москва: Машиностроение, 1990. 400 с.
11. Дьяков А.С., Сахно К.Н. Развитие технологий изготовления трубопроводов в рамках стратегии импортозамещения // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2015. Т. 13. С. 3516–3520. EDN: TWCPBZ
12. Абрамович В.Р., Алешин Д.В., Альшиц И.М., и др. Справочник по современным судостроительным материалам / под ред. Л.Я. Попилова. Ленинград: Судостроение, 1979. 584 с.
13. Стальниченко О.И. Материаловедение и технология материалов. Киев: Виц шк., 1986. 286 с.
14. Резников Н.И. Производительная обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. Москва: Машгиз, 1972. 352 с.
15. Фрумин Ю.Л. Высокопроизводительный резьбонарезающий инструмент. Москва: Машиностроение, 1977. 183 с.

REFERENCES

1. Copyright certificate N 1618535 / 08.09.1990. Kurbanov AZ, Abdullaev AV. Tapping tool for machining of difficult-to-machine materials. (In Russ.)
2. Matskevich VD, Garmashev AD. *Shipbuilding materials: Manual*. Leningrad: LKI; 1983. 94 p. (In Russ.)
3. Abasov I. *Fundamentals of three-dimensional modeling in 3dsMax: Manual*. Moscow: DMK Press; 2009. (In Russ.)
4. Gurevich YL, Gorokhov MV, Zakharov VI, et al. *Cutting modes of hard-to-machine materials: Reference book. ed. revis. suppl.* Moscow: Mashinostroenie; 1986. 240 p. (In Russ.)
5. Stirenko AS. 3dsMax 2009/3dsMaxDesign 2009. Self-tutorial. Moscow: DMK Press; 2013. (In Russ.)
6. Popilov LYa. New materials in shipbuilding: In 4 parts. Leningrad: Sudostroenie; 1966–1974. 365 p. (In Russ.)
7. Petrukhin PG. *Cutting of hard-to-machine materials*. Moscow: Mashinostroenie; 1980. 230 p. (In Russ.)
8. Poduraev VN. *Cutting processing of heat-resistant and stainless materials*. Moscow: Higher School; 2005. 245 p. (In Russ.)
9. Sakhno KN. *Designing of complex ship piping systems taking into account the errors of their manufacturing*. Astrakhan: Publishing house of Astrakhan State Technical University; 2008. 83 p. (In Russ.)
10. Baranchikov VI, Zharikov AI, Yudina ND, et al. *Progressive cutting tools and metal cutting modes: Reference book*. Baranchikov VI, editor. Moscow: Mashinostroenie; 1990. 400 p. (In Russ.)
11. Dyakov AS, Sakhno KN. Development of pipeline manufacturing technologies within the framework of import substitution strategy. *Scientific and methodological electronic journal "Concept"*. 2015;13:3516–3520. EDN: TWCPBZ (In Russ.)
12. Abramovich VR, Alyoshin DV, Alshits IM, et al. *Reference book on modern shipbuilding materials*. Popilov LYa, editor. Leningrad: Sudostroenie; 1979. 584 p. (In Russ.)
13. Stalnichenko OI. *Material science and technology of materials*. Kyiv: Vishch shk.; 1986. 286 p. (In Russ.)
14. Reznikov NI. *Productive machining by cutting of heat-resistant, high-strength and titanium alloys*. Moscow: Mashgiz; 1972. 352 p. (In Russ.)
15. Frumin YL. *High-performance thread cutting tools*. Moscow: Mashinostroenie; 1977. 183 p. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

***Али Зульпакарович Курбанов**, канд. техн. наук, профессор; адрес: Россия, 367015, Махачкала, пр-кт И. Шамиля, д. 70; eLibrary SPIN: 3867-2140; e-mail: kurbanov-48@mail.ru

Нурулла Магомедович Вагабов, канд. техн. наук, доцент; e-mail: vagabov01@inbox.ru

AUTHORS' INFO

***Ali Z. Kurbanov**, Cand. Sci. (Engineering), Professor; address: 70 I. Shamil ave, Makhachkala, 367015, Russia; eLibrary SPIN: 3867-2140; e-mail: kurbanov-48@mail.ru

Nurulla M. Vagabov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: vagabov01@inbox.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 621.125

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_43

Оригинальное исследование

Расчетное исследование эффективного винтового конденсатора пара

О.О. Лебедев

Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье рассматривается процесс конденсации пара в конденсаторе энергетической установки. Конденсатор пара — необходимый холодный источник в термодинамическом процессе энергетической установки, а также крупный, металлоемкий элемент, определяющий габаритные размеры энергетической установки. Новым техническим решением в вопросе повышения эффективности конденсатора пара круглой формы является предлагаемая конструкция — винтовой трубный пучок конденсатора пара. Теплообменные трубки данного пучка имеют овальную форму и закручены по винтовой траектории.

Методы. Проводятся расчеты трубного пучка конденсатора пара с различными параметрами овальности и винтовой закрутки. Для расчета использовали новый алгоритм — послойный расчет трубного пучка. Трубный пучок конденсатора разбивается на слои конденсации по мере движения пара от периферии к центру. Для каждого слоя осуществляется расчет коэффициентов теплообмена, площади поверхности конденсации, температурных коэффициентов и количества сконденсировавшегося тепла.

Результаты. Полученные результаты сравнивали с характеристиками трубного пучка парового конденсатора с прямолинейными охлаждающими трубками.

Выводы. По результатам расчетного исследования — максимального эффекта позволяет достичь совместное использование закручивания по винтовой траектории с изменением формы теплообменной трубки от круглого сечения до овального.

Ключевые слова: конденсатор; энергетическая установка; пар; тепловой обмен.

Как цитировать

Лебедев О.О. Расчетное исследование эффективного винтового конденсатора пара // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 43–50. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_43

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_43

Original study article

Calculation study of an efficient screw-type steam condenser

Oleg O. Lebedev

Saint Petersburg Marine Engineering Bureau «Malachite», Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The article examines steam condensation in a power plant condenser. The steam condenser is an indispensable cold source in the thermodynamic process of a power plant and the condenser is a large, metal-intensive component that determines the overall dimensions of the power plant. A new solution used to increase performance of a round steam condenser is the proposed design of a condenser tube bundle, a screw-type tube bundle for a steam condenser. Oval heat exchange tubes of the proposed bundle are helically twisted.

METHODS: The article calculates a tube bundle for a steam condenser with different out-of-roundness and swirl parameters using a new algorithm of nodal bundle calculation. The condenser tube bundle is broken down into condensation layers as the steam moves from the periphery to the center. For each layer, the heat transfer ratio, condensation surface area, temperature factors and the condensed heat are calculated.

RESULTS: The calculation results are compared with tube bundle performance of a steam condenser with linear cooling tubes.

CONCLUSIONS: The calculation shows that the maximum effect is achieved by the helical twisting and the reshaping of the circular heat exchange tube to an out-of-round one.

Keywords: condenser; power plant; steam; heat exchange.

To cite this article

Lebedev OO. Calculation study of an efficient screw-type steam condenser. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):43–50. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_43

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

Термодинамический цикл паротурбинных установок (ПТУ) предполагает обязательное наличие холодного источника в конце процесса расширения водяного пара в турбине.

В качестве такого источника используется составная часть ПТУ, называемая конденсационной установкой. Главной частью конденсационной установки является конденсатор пара.

Конденсатор пара в энергетической установке — крупногабаритный, металлоемкий, сложный теплообменный аппарат, выполняющий функцию необходимого «холодного» источника в термодинамическом цикле энергетических установок [1].

Традиционное техническое решение конструкции конденсатора пара, используемое в настоящее время в судостроении, — отработавший пар поступает на цилиндрический трубный пучок, состоящий из прямолинейных теплообменных трубок круглого сечения, внутри которых протекает охлаждающая вода. Пар движется от периферии к центру трубного пучка, взаимодействует с охлаждающей средой и конденсируется.

Экспериментальные исследования существующих конструкций трубных пучков показали: по глубине пучка по ходу пара тепловые нагрузки уменьшаются в 5–8 раз, что объясняется снижением скорости пара из-за непропорционального уменьшения проходного сечения по пару по отношению к изменению расхода пара.

Сохранение высоких значений тепловых нагрузок по всей поверхности теплообмена и тем самым уменьшение габаритов и металлоемкости конденсаторов возможно, если формировать проходное сечение по пару определенным образом, чтобы обеспечить поддержание постоянной скорости пара на всем пути его движения.

Этому принципу оптимизации формирования проходного сечения по пару, обеспечивающего максимальную эффективность теплообмена, соответствует трубный пучок треугольной формы (рис. 1) [2]. Однако данное

техническое решение не вписывается в общепринятые формы корпусов и водяных камер, что существенно затрудняет реализацию преимущества интенсификации процесса теплообмена для улучшения массогабаритных характеристик по сравнению с трубными пучками цилиндрической формы.

Повысить эффективность теплообмена и тем самым улучшить габаритные характеристики трубных пучков круглой формы можно, если, не изменяя шага разбивки трубного пучка, спрофилировать проходное сечение по пару таким образом, чтобы скорость движения пара на всем пути следования имела бы постоянное, оптимальное значение (рис. 2). Поддержание постоянной скорости пара в межтрубном пространстве при сохранении круглой формы и технологии заделки трубок в трубных досках достигается применением двух способов формирования геометрии теплообменных трубок:

- трубки закручены под углом по винтовой траектории;
- изменение овальности теплообменных трубок.

При движении пара к центру трубного пучка ось овальности разворачивается от радиального положения до положения перпендикулярно движению пара.

Новым техническим решением в вопросе повышения эффективности конденсатора пара круглой формы является конструкция трубного пучка конденсатора — винтовой трубный пучок конденсатора пара [3, 4].

Для расчета винтового конденсатора пара разработана методика послойного теплового расчета по алгоритму расчета винтового трубного пучка конденсатора пара [5].

Алгоритм теплового расчета винтового конденсатора заключается в следующем:

- трубный пучок конденсатора в поперечном сечении разбивается на слои, каждый из которых является рядом охлаждающих трубок на одном расчетном радиусе по направлению движения пара от периферии к центру трубного пучка;

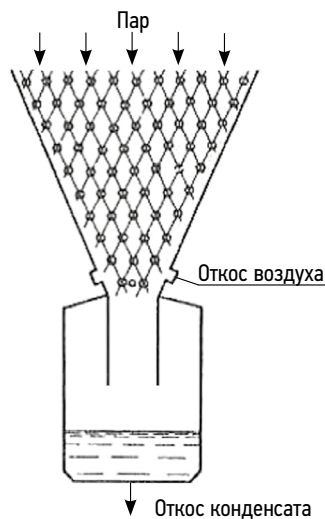


Рис. 1. Трубный пучок треугольной формы [2].
Fig. 1. Triangular tube bundle [2].

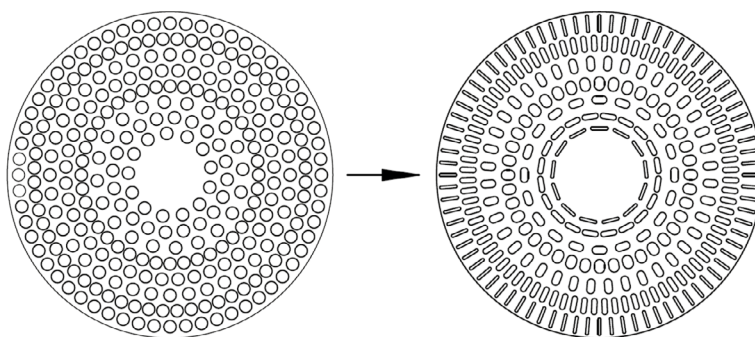


Рис. 2. Изменение геометрии трубного пучка.
Fig. 2. Changing the shape of the tube bundle.

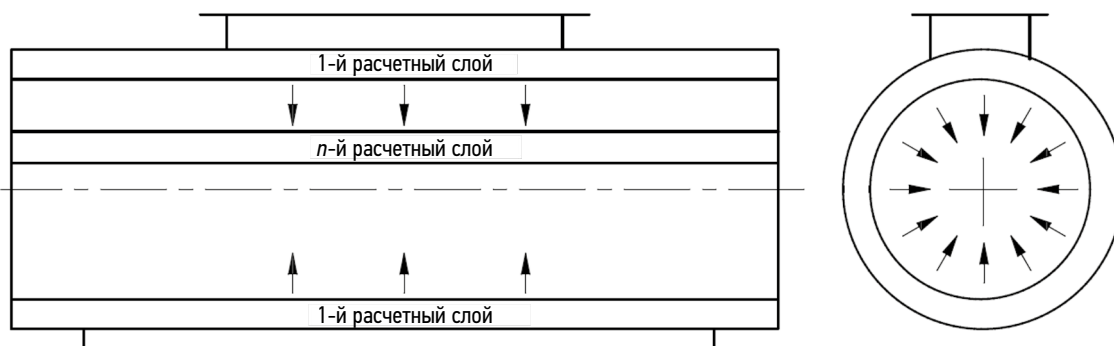


Рис. 3. Послойный тепловой расчет конденсатора.
Fig. 3. Nodal thermal calculation of a condenser.

- для каждого слоя (ряда трубок) производится тепловой расчет по схеме «охлаждающая вода — стенка трубки — паровоздушная смесь» («вода — стенка — пар»);
- на каждом слое определяются оптимальная конструкция охлаждающих трубок — овальность и угол закрутки, при которой обеспечивается отвод максимального количества тепла;
- после получения оптимальных параметров конструкции теплообменных трубок на слое производится переход на следующий (более нижний) слой, начальными параметрами расчета для которого являются значения, полученные на предыдущем слое (рис. 3).

Для каждого слоя теплообменных трубок производится тепловой расчет, в основе которого анализ определения количества теплоты, отводимого конденсатором от пара в охлаждающую воду, которое определяется по формуле:

$$Q_{\text{конд.}} = K_t \cdot F_t \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Для исследования влияния угла закрутки и овальности на тепловые характеристики конденсатора выполнены следующие расчеты:

- расчет конденсатора пара с прямолинейными круглыми трубками;
 - расчет отдельного слоя конденсатора с изменением овальности без изменения угла закрутки;
 - расчет отдельного слоя конденсатора с изменением угла закрутки без изменения овальности;
 - расчет конденсатора пара с закруткой трубок и постоянной овальностью;
 - расчет конденсатора пара с закруткой трубок и переменной овальностью.
1. Расчет конденсатора пара с прямолинейными круглыми трубками.
Расчетная зона — конденсатор в целом.
Овальность — постоянная (16 мм, трубки круглые).
Угол закрутки — отсутствует (конденсатор прямолинейный).
Результаты расчета приведены в табл. 1.
Количество сконденсированного тепла в зависимости от слоя указано на рис. 4.
По результатам рассмотрения графика (рис. 4) можно сделать следующие выводы:
 - количество сконденсированного пара (количество отведенного тепла) падает при движении от периферии к центру.
 2. Расчет отдельного слоя конденсатора с изменением овальности без изменения закрутки.
Расчетная зона — первый слой.
Овальность — переменная от 16 до 21 мм (большой диаметр).
Угол закрутки — отсутствует.
Результаты расчета:
Количество сконденсированного тепла в зависимости от овальности представлено на рис. 5.
По результатам рассмотрения графика (рис. 5) можно сделать следующие выводы:
 - количество сконденсированного пара падает с увеличением овальности, что объясняется уменьшением парового сопротивления и, соответственно, падением скорости пара.

Таблица 1. Результаты расчета конденсатора пара с прямолинейными круглыми трубками

Table 1. Calculation of a steam condenser with circular line tubes

Параметр конденсатора	Значение
Общее число трубок, шт.	9081
Общая поверхность теплообмена, м ²	2966,99
Кол-во теплоты, ккал	76 274 964,64

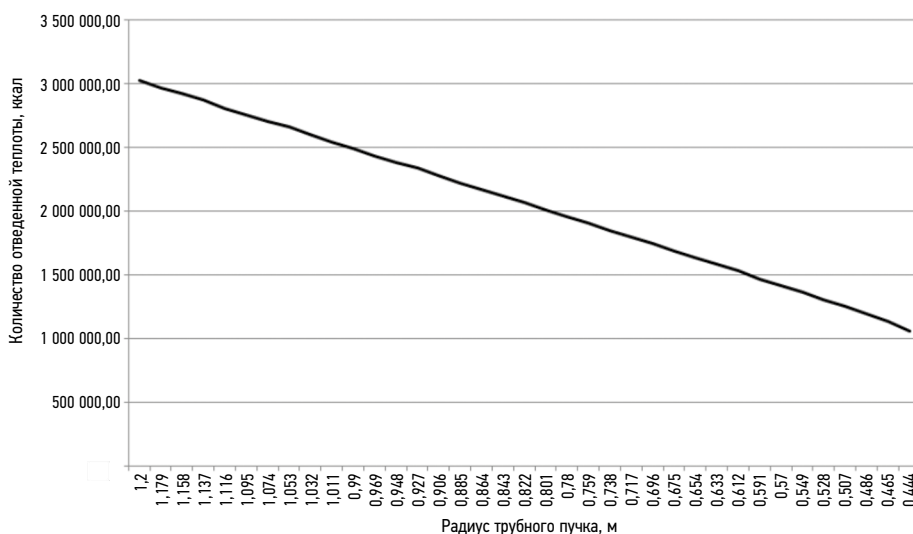


Рис. 4. Количество отведенной теплоты, ккал.
Fig. 4. Rejected heat, kcal.

3. Расчет отдельного слоя конденсатора с изменением закрутки без изменения овальности.

Расчетная зона — первый слой.

Овальность — без изменения (16 мм, трубка круглая).

Угол закрутки — от 9 до 35 градусов.

Результаты расчета представлены на рис. 6.

По результатам рассмотрения графика (рис. 6) можно сделать следующие выводы:

- количество сконденсировавшегося пара растет;
- скорость пара растет (до недопустимых значений).

4. Расчет отдельного слоя конденсатора с изменением закрутки и овальности.

Расчетная зона — первый слой.

Овальность — переменная от 16 до 20 мм (большой диаметр).

Угол закрутки — от 0 до 61 градуса (в зависимости от установленной максимальной скорости пара).

Установленная максимальная скорость пара — 87, 100 и 200 м/с.

Результаты расчета представлены на рис. 7.

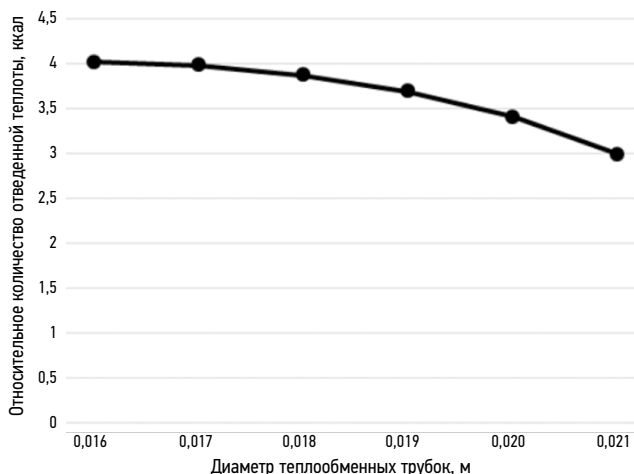


Рис. 5. Относительное изменение количества отведенной теплоты, %.
Fig. 5. Fractional variation of rejected heat, %.

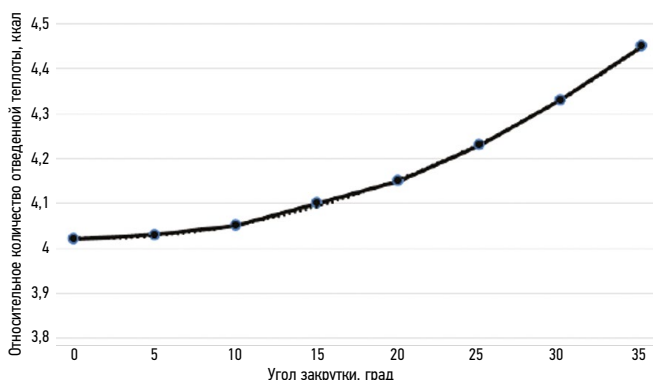


Рис. 6. Относительное изменение количества отведенной теплоты, %.
Fig. 6. Fractional variation of rejected heat, %.

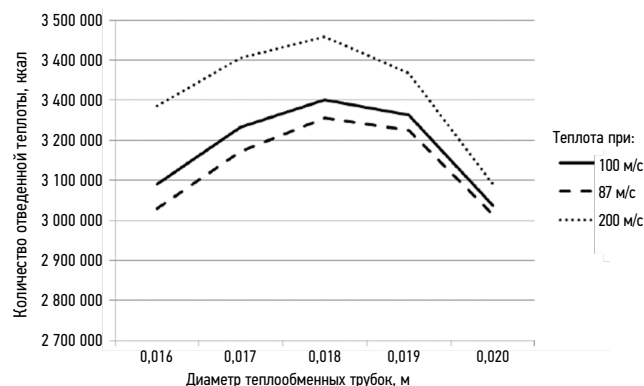


Рис. 7. Количество отведенной теплоты при разных скоростях пара, ккал.
Fig. 7. Rejected heat at different steam velocities, kcal.

По результатам рассмотрения графиков (рис. 7) можно сделать следующие выводы:

- максимальное количество сконденсировавшегося пара достигается на среднем значении овальности 18 мм;
- значение угла закрутки зависит от допустимой максимальной скорости пара;
- существует оптимальное значение угла закрутки и степени овальности, при которых достигается максимальное значение количества отводимой тепловой энергии.

5. Расчет конденсатора пара с изменением закрутки с постоянными круглыми трубками.

Расчетная зона — конденсатор в целом.
Овальность — постоянная (16 мм, трубки круглые).
Угол закрутки — переменный от 9 до 39 градусов.
Результаты расчета приведены в табл. 2.

По результатам рассмотрения графика (рис. 8) можно сделать следующие выводы:

- уменьшение общего количества трубок по сравнению с прямолинейным конденсатором на 6,6 %;
- увеличение площади теплообмена по сравнению с прямолинейным конденсатором на 3,8 % в тех же габаритах трубного пучка (длина и диаметр).

Таблица 2. Результаты расчета конденсатора пара с изменением закрутки с постоянными круглыми трубками

Table 2. Calculation of a variable swirl steam condenser with constant circular tubes

Параметр конденсатора	Значение
Общее число трубок, шт.	8514
Общая поверхность теплообмена, м ²	3084,52
Кол-во теплоты, ккал	75 498 878,36
Улучшение по количеству трубок, %	+6,66
Улучшение по площади поверхности, %	-3,81

6. Расчет конденсатора пара с изменением угла закрутки с постоянными овальными трубками.

Расчетная зона — конденсатор в целом.
Овальность — постоянная (18 мм, трубки оральные).
Угол закрутки — переменный от 38,5 до 52,5 градусов.
Результаты расчета представлены в табл. 3.

По результатам рассмотрения графика (рис. 9) можно сделать следующие выводы:

- уменьшение общего количества трубок по сравнению с прямолинейным конденсатором на 13,2 %;
- увеличение площади теплообмена по сравнению с прямолинейным конденсатором на 20,4 % в тех же габаритах трубного пучка (длина и диаметр).

7. Расчет конденсатора пара с изменением угла закрутки и изменением овальности.

Расчетная зона — конденсатор в целом.
Овальность — переменная (от 19 мм на периферии до 17 мм в центре).

Угол закрутки — переменный от 41 до 50,5 градусов.
Результаты расчета представлены в табл. 4.

По результатам рассмотрения графика (рис. 10) можно сделать следующие выводы:

- уменьшение общего количества трубок по сравнению с прямолинейным конденсатором на 13,2 %;

Таблица 3. Результаты расчета конденсатора пара с изменением угла закрутки с постоянными овальными трубками

Table 3. Calculation of a variable swirl steam condenser with constant oval tubes

Параметр конденсатора	Значение
Общее число трубок, шт.	8023
Общая поверхность теплообмена, м ²	3727,81
Кол-во теплоты, ккал	75 408 460,55
Улучшение по количеству трубок, %	+13,187
Улучшение по площади поверхности, %	-20,409

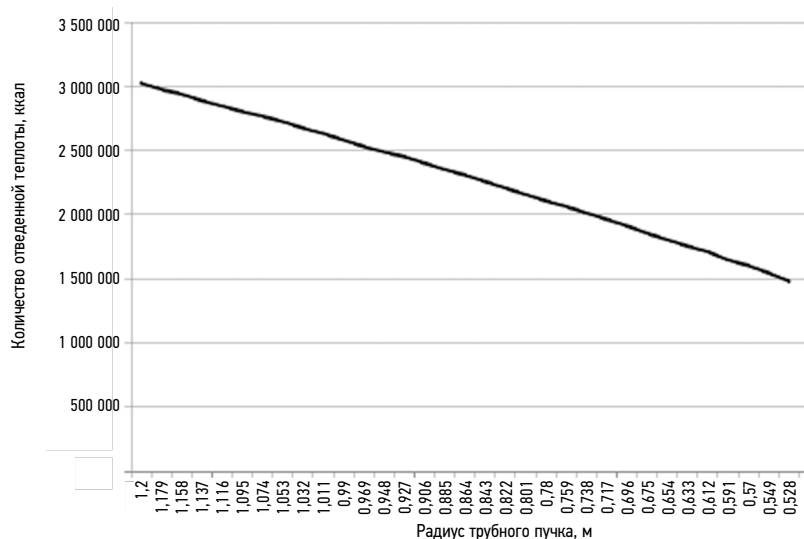


Рис. 8. Количество отведенной теплоты трубного пучка с винтовыми круглыми трубками, ккал.

Fig. 8. Heat rejected by a tube bundle with helical circular tubes, kcal.

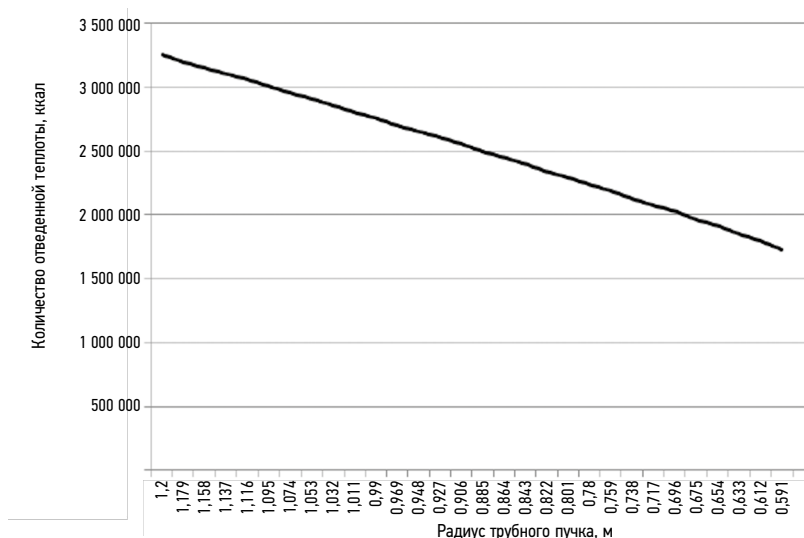


Рис. 9. Количество отведенной теплоты трубного пучка с винтовыми овальными трубками, ккал.
Fig. 9. Heat rejected by a tube bundle with helical oval tubes, kcal.

– увеличение площади теплообмена по сравнению с прямолинейным конденсатором на 22,3 % в тех же габаритах трубного пучка (длина и диаметр).

Таблица 4. Результаты расчета конденсатора пара с изменением угла закрутки и изменением овальности

Table 4. Calculation of a variable swirl and out-of-roundness steam condenser

Параметр конденсатора	Значение
Общее число трубок, шт.	8023
Общая поверхность, м ²	3815,15
Кол-во теплоты, ккал	75 152 276,73
Улучшение по количеству трубок, труб, %	+13,187
Улучшение по площади поверхности, %	-22,231

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное расчетное исследование по эффективности винтового конденсатора позволяет отметить следующее:

Изменение теплообменных трубок от круглого сечения до овального позволяет в широком диапазоне изменять скорость пара.

Изменение формы сечения теплообменных трубок от круглого сечения до овального приводит к уменьшению проходного сечения по охлаждающей воде, что снижает

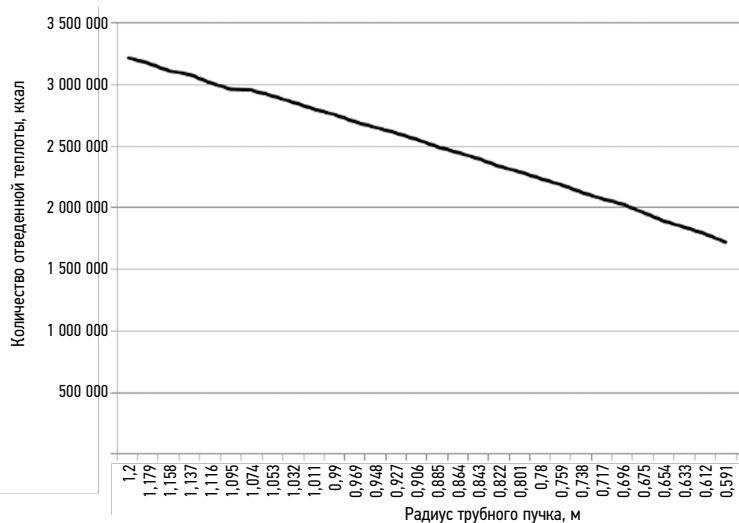


Рис. 10. Количество отведенной теплоты трубного пучка с винтовыми трубками, ккал.
Fig. 10. Heat rejected by a tube bundle with helical circular tubes, kcal.

эффективность теплообмена за счет снижения теплового напора.

Закручивание теплообменных трубок по винтовой траектории позволяет разместить большую поверхность теплообмена по сравнению с прямыми трубками и тем самым увеличить эффективность теплообмена.

Максимальный эффект позволяет достичь совместное использование (для формирования поверхности теплообмена) закручивания по винтовой траектории с изменением формы теплообменной трубки от круглого сечения до овального.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чистяков В.А., Архипов Г.А. Комплексный метод проектирования конденсационных установок. В кн.: Труды Ленинградского кораблестроительного института. 1990. С. 4–15.
2. Шкловер Г.Г., Мильман О.О. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
3. Патент № 2725738/ 2020. Лебедев О.О. Трубный пучок конденсатора пара.

REFERENCES

1. Chistyakov VA, Arkhipov GA. Complex method of design of condensation plants. In: *Proceedings of the Leningrad shipbuilding institute*. 1990. P. 4–15. (In Russ.)
2. Shklover GG, Millman OO. *Research and calculation of steam turbine condensing devices*. Moscow: Energoatomizdat; 1985. 240 p. (In Russ.)
3. Patent N 2725738/ 2020. Lebedev OO. Pipe bundle of steam condenser. (In Russ.)

ОБ АВТОРЕ

Олег Олегович Лебедев;

адрес: Россия, 196135, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, д. 18;
eLibrary SPIN: 8549-3254; e-mail: oo-lebedev@mail.ru

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The author declares that they have no competing interests.

4. Лебедев О.О. Разработка трубного пучка рациональной конструкции для конденсатора паровых турбин // Морской вестник. 2019. № 3. С. 80–81. EDN: MIDYOT

5. Лебедев О.О. Алгоритм расчета винтового конденсатора пара // Судостроение. 2020. № 5. С. 23–25. EDN: PUXITH

4. Lebedev OO. Development of tube bundle of rational design for steam turbine condenser. *Marine Bulletin*. 2019;(3):80–81. EDN: MIDYOT (In Russ.)

5. Lebedev OO. Calculation algorithm for screw-shaped condenser of steam turbines. *Shipbuilding*. 2020;(5):23–25. EDN: PUXITH

AUTHOR INFO

Oleg O. Lebedev;

address: 18 Frunze st, Saint Petersburg, 196135, Russia;
eLibrary SPIN: 8549-3254; e-mail: oo-lebedev@mail.ru

УДК 629.021

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_51

Оригинальное исследование

Анализ потерь трудоемкости после корректировки эксплуатационной документации на строящемся заказе

М.Д. Мовчанова¹, А.С. Недорезанюк², В.В. Трусов², А.Б. Фомичев¹¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия² Адмиралтейские верфи, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Активное развитие Арктической зоны России и Северного морского пути требует усиления мер безопасности. На Северном морском пути уже работают семь ледоколов, но патрульные корабли отсутствуют в Арктическом регионе. Для обеспечения национальной безопасности в Арктике необходимо в кратчайшие сроки построить суда для службы. При строительстве головных заказов возникают конструктивные и технологические изменения, что необходимо учитывать при планировании сроков строительства и времени на доработку документации. В данной статье рассматривается процесс перетрассировки трубопроводов системы на строящемся заказе после внесения изменений в эксплуатационную документацию головного заказа и, как следствие, корректировки рабочей конструкторской документации.

Цель — выяснить, как процесс перетрассировки трубопроводов влияет на процесс постройки заказа.

Методы. В ходе написания работы были выполнены анализ литературных источников в области оптимизации судостроительного производства и производственный эксперимент с последующим сравнительным анализом.

Результаты. Устранение разночтений повлекло за собой изменения в графике строительства заказа.

Выводы. Несвоевременное внесение изменений в техническую документацию негативно влияет на сроки строительства. Производственный эксперимент позволил сделать выводы о важности осмотра проблемного участка всеми подразделениями и об актуальности применения автоматизированных систем.

Ключевые слова: судостроение; технология; монтаж; трудоемкость; анализ; эксплуатационная документация.

Как цитировать

Мовчанова М.Д., Недорезанюк А.С., Трусов В.В., Фомичев А.Б. Анализ потерь трудоемкости после корректировки эксплуатационной документации на строящемся заказе // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 51–59. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_51

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_51

Original study article

Analysis of labor intensity losses upon amendments to operational documentation for a construction project

Marina D. Movchanova¹, Aleksey S. Nedorezanyuk², Vasiliy V. Trusov², Andrei B. Fomichev¹

¹ Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

² Admiralty Shipyards, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Active development of the Russian Arctic and the Northern Sea Route requires increased security. Now, there are seven icebreakers operating on the Northern Sea Route, but there are no patrol ships in the Arctic Region. To ensure national security in the Arctic, it is required to build ships as soon as possible. In prime contracts, designs and solutions often change, which shall be considered in construction and document finalization schedules. The authors examine the pipeline rerouting in a system of a construction project after amendments have been made to the prime contract operational documentation and, accordingly, to the working construction documentation.

AIM: To find out how the pipeline rerouting process affects the construction process.

METHODS: The article analyses the literature related to improvement of shipbuilding products and provides an overview of an industrial experiment with further comparative analysis.

RESULTS: When the discrepancies are eliminated, the construction schedule of the project changes.

CONCLUSIONS: Failure to timely amend the design documentation affects the construction schedule. The industrial experiment allowed us to conclude on the importance of inspecting the problematic area by all departments and the relevance of using automated systems.

Keywords: shipbuilding; technology; installation; labor intensity; analysis; operational documentation.

To cite this article

Movchanova MD, Nedorezanyuk AS, Trusov VV, Fomichev AB. Analysis of labor intensity losses upon amendments to operational documentation for a construction project. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):51–59.

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_51

ВВЕДЕНИЕ

Согласно утвержденной Президентом Российской Федерации Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года одной из мер выполнения задач в сфере обеспечения военной безопасности является совершенствование состава и структуры Вооруженных Сил Российской Федерации в Арктической зоне¹. Также в этом документе уделяется внимание развитию инфраструктуры путем строительства флота в Арктической зоне². Из чего следует вывод, что строительство судов ледового типа является актуальной для страны задачей.

На Северном морском пути в настоящее время выполняют свои задачи семь ледоколов: мелкоосадочные атомные ледоколы «Ямал» и «50 лет Победы» (пр. 10580), атомные ледоколы «Таймыр» и «Вайгач» (пр. 10521), универсальные атомные ледоколы нового поколения «Арктика», «Сибирь» и «Урал» (пр. 22220)³ [1 с. 164]. Анализ судов Военно-Морского Флота страны показал, что патрульные корабли входят только в состав Черноморского флота⁴. Стремительный скачок развития инфраструктуры Арктической зоны России подразумевает параллельный рост уровня задач, связанных с национальной безопасностью в этом регионе, что говорит об актуальности строительства судов для службы в районе Северного морского пути⁵ в кратчайшие сроки.

Строительству судов «точно в срок», о чем гласит идеал Объединенной судостроительной корпорации (ОСК)⁶, препятствуют потери на переделку. Причинами переделок на строящемся заказе могут быть как ошибки проектанта или завода-строителя, так и решение вышестоящих организаций. Необходимость переделки может возникнуть на любом этапе работ (на стадии и построечных удостоверений, и швартовных удостоверений). Одной из специфических особенностей судостроения является большое число конструктивных и технологических изменений при постройке головного заказа [2], поэтому при составлении производственных графиков по головному заказу

должны изначально закладываться часы трудоемкости на доработку и корректировку документации, увеличивающие сроки строительства заказа⁷.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Существование каждого судна подразделяется на следующие стадии жизненного цикла изделия: проектирование, постройка, эксплуатация, ремонт и модернизация, утилизация. По ГОСТу, описывающему порядок проектирования и постройки судов, постройка головного заказа включает в себя следующие работы: разработка и отработка рабочей конструкторской документации (РКД), подготовка производства, постройка, проведение испытаний и сдача⁸. Чертежи систем и эксплуатационная документация (ЭД) выпускаются проектантом на стадии разработки РКД. Эксплуатационные документы предназначены для обеспечения эксплуатации судна в целом, его составных частей и комплектующих судно изделий, изучения их конструкции и правил эксплуатации, отражения сведений, удостоверяющих гарантированные изготовителем значения основных параметров и характеристик (свойств), гарантийных обязательств и сведений по эксплуатации в течение установленного срока службы, а также для обучения экипажа⁹. В комплект ЭД на продукцию входят специальные эксплуатационные инструкции, которые также называют техническими описаниями (ТО)¹⁰.

На этапе разработки РКД проектная организация передает разработанные чертежи систем заводу-строителю, после чего завод составляет документ разбивки на построечные удостоверения (УП). Под УП понимаются внутренние документы судостроительного завода, по которым осуществляется приемка отдельных видов работ по строительству судна представителями Заказчика. После закрытия УП завод выходит на процедуру швартовных испытаний (ШИ). К началу ШИ должны быть завершены работы по постройке судна в объеме, который предусмотрен УП. На системы и изделия разрабатываются отдельные методики ШИ, на базе которых формируют разбивку работ по швартовным удостоверениям (УШ). Во время

¹ Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». С. 21. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033?pageSize=10&index=1> (дата обращения: 18.09.2024).

² Там же. С. 12.

³ Лекция Забавы Устиновой. От деревянных судов до современных атомных ледоколов. Выступление на Арктическом салоне 25.08.2024. Санкт-Петербург: Петропавловская крепость.

⁴ russianships.info [Электронный ресурс]. Военно-Морской Флот России. URL: <https://russianships.info/> (дата обращения: 07.05.2024).

⁵ www.rosatom.ru [Электронный ресурс]. Логистика и развитие Северного морского пути. URL: <https://www.rosatom.ru/production/fleet/> (дата обращения: 06.05.2024).

⁶ ГОСТ Р 56020-2020 Бережливое производство. Основные положения и словарь: дата введения 2021-08-01. Москва: Стандартинформ, 2020. С. 3.

⁷ Приказ Минпромторга РФ от 14.03.2023 № 822. Об утверждении порядка определения трудоемкости проектирования, строительства, ремонта, утилизации судна (зарегистрировано в Минюсте РФ 04.04.2023 № 72870). URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/48205?items=1&page=9> (дата обращения: 18.09.2024).

⁸ Порядок проектирования и постройки: дата введения 2020-07-01. Москва: Стандартинформ, 2020. С. 14.

⁹ ГОСТ Р 2.601-2019 Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы: дата введения 2020-02-01. Москва: Стандартинформ, 2020. С. 5; Эксплуатационные документы. Правила составления, согласования и поставки: дата введения 2020-07-01. Москва: Стандартинформ, 2020. С. 7.

¹⁰ ГОСТ Р 2.601-2019 Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы: дата введения 2020-02-01. Москва: Стандартинформ, 2020. С. 8.

предъявления УШ строители и мастера цехов начинают работу с техническими описаниями (ТО) и программами методик (ПМ).

Строительство головных и серийных заказов на заводах-строителях ведется группой технического сопровождения (ТС) конструкторского бюро. ТС постройки проводят постоянно с момента начала работ по договору до сдачи заказа в эксплуатацию путем оперативного проведения работ по решению технических вопросов, оказанию консультативной и методической помощи заводу-строителю¹¹. Одним из видов реализации мероприятий по ТС является выпуск предварительных извещений об изменении (ПИ). Однако согласно положению о ТС рассматриваемого проекта корректировка ЭД разрешается без выпуска ПИ. Представитель конструкторского бюро вносит необходимые изменения в контрольный экземпляр временного комплекта согласованных ТО или ПМ, хранящийся в испытательной партии. Внесенные вручную изменения фиксируются в «Журнале учета изменений ТО и ПМ временного комплекта». По окончании проведения испытаний завод-строитель передает копии контрольных экземпляров в конструкторское бюро для учета внесенных изменений при выпуске постоянного комплекта ЭД. Такой подход к согласованию документов правомерен¹².

Одной из причин переноса оборудования, а вследствие и подводных систем, на строящемся заказе может быть замечание Заказчика, которое связано с импортозамещением [3]. На рассматриваемом проекте причиной корректировки ТО системы стало изменение количества потребителей по требованию Заказчика, что привело к разночтениям в РКД и ЭД. На момент корректировки ЭД система уже была собрана на заказе, соответственно, необходима была переделка в затронутых помещениях, которая привела к потерям трудоемкости и увеличению сроков сдачи системы в частности и судостроительного заказа в целом.

Теоретическая значимость данного исследования состоит в развитии отечественного судостроения и анализе возможности сокращения сроков строительства за счет уменьшения потерь на переделку после корректировки ЭД в частности. В открытом доступе не так много методических указаний и рекомендаций по оптимизации судостроительной промышленности, поэтому **практическая значимость** заключается в исследовании потерь времени на переделку, оптимизации планирования рабочего процесса и предоставлении информативной справки для предотвращения подобных потерь трудоемкости на серийном заказе в дальнейшем.

Цель исследования — выяснить, как процесс перетрассировки трубопроводов влияет на процесс постройки заказа.

Гипотеза исследования. Потери трудоемкости на переделку трубопроводов систем на строящемся заказе, связанные с разночтениями РКД и ЭД после замечаний Заказчика в связи с импортозамещением, в период швартовных испытаний приводят к задержке сроков сдачи судна Заказчику.

МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе написания работы были применены следующие методы исследования:

- организационный (анализ литературных источников в области оптимизации судостроительного производства);
- производственный эксперимент;
- интерпретационный (сравнительный анализ и описание полученных данных).

Проблеме постройки ледоколов был посвящен ряд публикаций в научных журналах и докладов на научно-практических конференциях России, в то же время особого внимания требуют перспективы строительства судов ледового класса [4].

Практическое исследование проводилось на проекте судна ледового типа для Военно-Морского Флота Российской Федерации. Строительство серии предоставлено АО «Адмиралтейские верфи». Совместно с представителями Трубомедницкого цеха № 22 завода-строителя был проведен производственный эксперимент, по результатам которого была составлена хронология решения вопроса несовпадения технического описания и чертежа системы, а также график решения возникшей проблемы потерь на переделку.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На головном заказе рассматриваемого в исследовании проекта 45 % потерь на переделку приходятся на перетрассировку труб, 25 % — на изменение прокладки кабельных трасс, 20 % — на перемещение оборудования и 10 % — на перетрассировку систем вентиляции [3]. Данное исследование затрагивает область потерь переделки трубопроводов на стадии швартовных испытаний.

Корректировка по требованиям Заказчика после внесения изменений в ЭД включала в себя четыре помещения, в одном из которых насыщенность смежных систем и расположенного оборудования не позволила провести запланированную трассировку с первого раза. В результате решения возникшей проблемы были затронуты две смежные системы и подвод кабеля к оборудованию

¹¹ СТО ОСК.КСМК 03-002-2019 Система менеджмента качества. Порядок организации и проведения авторского надзора и технического сопровождения постройки заказов в обществах Группы ОСК. Основные положения. Москва, 2019.

¹² Эксплуатационные документы. Правила составления, согласования и поставки: дата введения 2020-07-01. Москва: Стандартинформ, 2020. С. 11.

Процедура решения возникшей проблемы

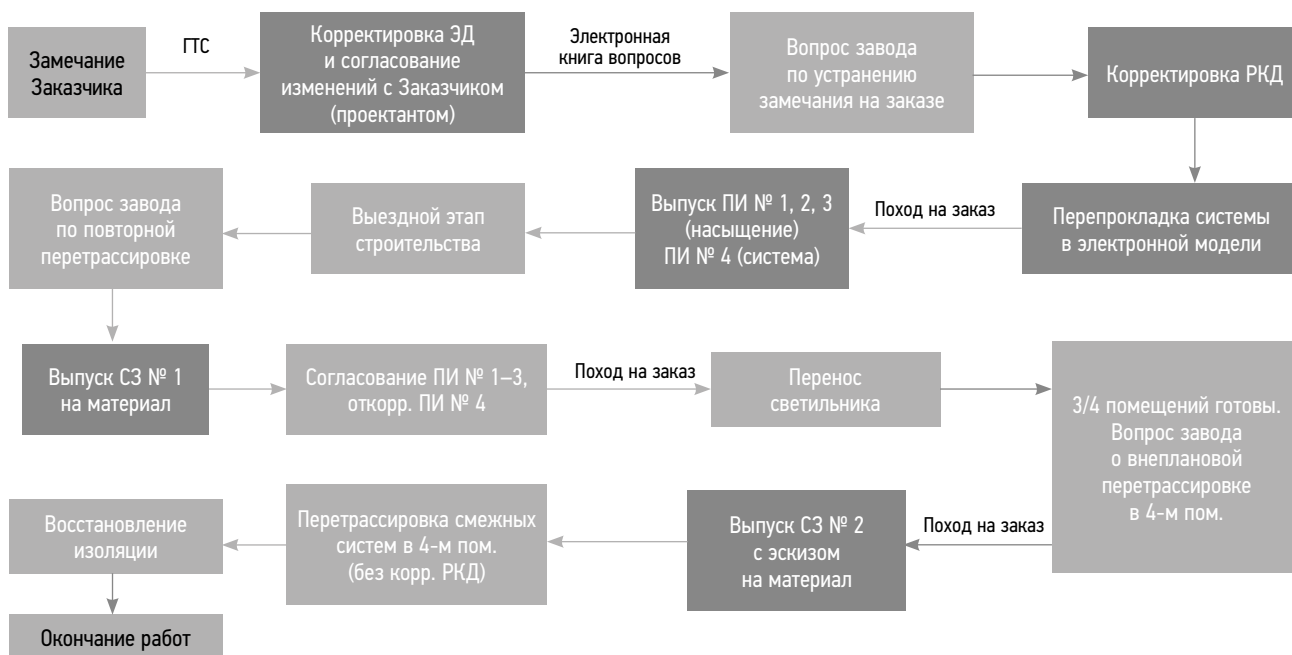


Рис. 1. Схема процедуры решения возникшей проблемы на рассматриваемом проекте. ГТС — группа технического сопровождения; ЭД — эксплуатационная документация; РКД — рабочая конструкторская документация; ПИ — предварительное извещение; СЗ — служебная записка.

Fig. 1. The process used to solve the problem in the project: ГТС, Maintenance Group; ЭД, operational documentation; РКД, working construction documentation; ПИ, advance notice; СЗ, memorandum.

в этом помещении, что привело к еще большему увеличению срока закрытия вопроса. Схема решения представлена на рис. 1.

В табл. 1 отображена хронология действий со стороны мастеров, отвечающих за монтаж системы, инженерного центра, службы технологов, отдела строителей, отдела «ЭРА» (ЭлектроРадиоАвтоматика) и проектного бюро. Для более точного исследования была использована информационная площадка связи завода-строителя с проектным бюро — Электронная книга вопросов.

В процессе решения вопроса были задействованы следующие подразделения: конструкторское бюро, отдел технологов, отдел строителей, трубомедницкий цех и цех изоляционно-защитных покрытий.

Общее время решения вопроса перетрассировки систем после корректировки ТО на стадии закрытия УШ заняло 111 рабочих дней. На решение вопроса со стороны конструкторского бюро ушло 28 дней (25,2 % от общего времени решения вопроса), в том числе на выпуск и на доведение предварительных извещений до архива завода 20 рабочих дней (18,1 % от общего времени). Суммарное время работ трубомедницкого цеха по замененным листам альбомов труб [5] составило 19 рабочих дней (17,1 % от общего времени). Восстановление поврежденной изоляции было выполнено за 3 дня (~3 % от общего времени).

Начинать работы после попадания в архив ПИ по перетрассировке трубопроводов было нецелесообразно, так как заказ отправлялся на выездной этап строительства, и первоочередной задачей было подготовить системы хозяйственно-бытовых нужд для проживания на судне рабочих, обеспечивающих этот этап строительства. Таким образом, разрыв между первым и вторым этапами решения возникшей проблемы обусловлен плановым выездным этапом строительства судна длительностью 3 недели.

По возвращению на завод-строитель после выездного этапа строительства цех столкнулся с проблемой дефицита материала для выполнения трубопроводов. Данную причину простоя можно считать субъективной. После выполнения ПИ на доработку и выпуска служебных записок норма не была еще закуплена. Такие задержки поставки материала не являются закономерностью, но это необходимо учитывать при планировании графиков. После поставки на завод одного из основных металлов, используемых в машиностроении, возобновилась работа трубомедницкого цеха.

Простой между вторым и третьим этапом решения проблемы был связан с активным предъявлением сварочных удостоверений по другим системам проекта. Пока предъявлялись системы Заказчику, выполнялся монтаж оставшихся по графику трубопроводов. Когда система была перетрассирована в рассматриваемом помещении

Таблица 1. Хронология решения вопроса перетрассировки системы после корректировки эксплуатационной документации
Table 1. System rerouting timeline after amending the operational documentation

Дата	Действие
02.10 (пн.)	Задан вопрос в электронной книге вопросов
<i>Первый этап решения проблемы</i>	
06.10 (пт.)	Начало корректировки модели конструктором системы в конструкторском бюро
9.10 (пн.) — 10.10 (вт.)	Выпуск предварительного извещения № 1 на перенос насыщения
11.10 (ср.) — 12.10 (чт.)	– Завершена корректировка электронной модели – Выпуск предварительного извещения № 2 и предварительного извещения №3 на ввод дополнительного насыщения корпусных секций – Конструкторы инженерного центра согласовали предварительные извещения № 1, 2, 3 по насыщению корпусных конструкций
13.10 (пт.)	Предварительные извещения № 1, 2, 3 завизированы строителями завода
16.10 (пн.)	Прохождение проверок перетрассировки в электронной модели для создания спецификации и видов сборочного чертежа
17.10 (вт.)	– Предварительные извещения № 1, 2, 3 проверены отделом технологов – Завершена работа с электронной моделью
18.10 (ср.)	– Предварительные извещения №1, 2, 3 переданы в архив – Выпущено предварительное извещение № 4 на перетрассировку системы – Предварительное извещение № 4 подписано строителем завода
20.10 (пт.)	Выпуск служебной записки № 1 группы технического сопровождения на дополнительный материал для переделки труб по предварительному извещению
23.10 (пн.)	– Поход на заказ с мастером цеха – Принято решение о переносе светильника в помещении и перетрассировке кабеля – Служебная записка № 1 согласована службами завода
26.10 (чт.)	Предварительное извещение № 4 подписано инженерным центром завода
31.10 (вт.)	Предварительное извещение № 4 завизировано отделом технологов завода
02.11 (чт.)	Предварительное извещение № 4 передано в архив
03.11 (пт.) — 24.11 (пт.)	Выездной этап строительства
<i>Второй этап решения проблемы</i>	
29.01 (пн.)	Начало изготовления и монтажа перетрассированной системы на заказе
07.02 (ср.)	– Перетрассировка системы завершена в трех из четырех помещений – Выявлена невозможность перетрассировки в четвертом помещении в связи с загруженностью помещения
<i>Третий этап решения проблемы</i>	
21.02 (ср.)	Связь строителя и конструкторов
22.02 (чт.)	– Поход на заказ конструктора с целью зрительного осмотра четвертого помещения для перетрассировки – Выпуск служебной записки № 2 на дополнительный материал для переделки труб на заказе с целью ускорения работ на заказе
26.02 (пн.)	Принятие решения по электронной модели
27.02 (вт.)	– Поход на заказ конструкторов с заместителем начальника цеха, мастером системы, строителем – Завершена работа с электронной моделью для выполнения эскиза, который был дополнением к служебной записке № 2 – Служебная записка № 2 с дополнительным эскизом согласована службами завода
28.02 (ср.) — 13.03 (ср.)	Перетрассировка смежных систем в помещении (строителями принято решение «выполнить без корректировки рабочей конструкторской документации»)
13.03 (ср.) — 15.03 (пт.)	– Восстановление изоляции труб перетрассированных систем – Вопрос электронной книги вопросов закрыт

по эскизам служебной записки, возникла необходимость в избежании пересечений со смежными системами в данном помещении. Стоит отметить, что большой диаметр позиций и материал системы стали отягощением при изготовлении и монтаже перетрассированного трубопровода в кратчайшие сроки. В условиях дальнейшего дефицита материала для системы строители заказа приняли решение о перетрассировке смежных систем меньшим диаметром без корректировки РКД. После восстановления изоляционного покрытия на перетрассированных системах вопрос был отработан.

По результатам составления хронологии решения проблемы переделки при помощи систем автоматизированного проектирования была выполнена диаграмма Ганта. Для удобства прочтения и отображения информации график решения возникшей на строящемся заказе проблемы разбит на две части (рис. 2 и 3).

Величина потерь на переделки может оказаться значительной в случае позднего обнаружения проблемы. Из вышеизложенного можно сделать заключение, что замечание Заказчика и корректировка ЭД ярко отразились на сроке выполнения изменений

на строящемся заказе. Одним из решений проблемы может быть применение принципа производственной системы «решение проблем на месте их возникновения».

Уменьшить срок переделки на заказе можно было путем сокращения времени отработки вопроса как со стороны завода-строителя, так и со стороны проектного бюро:

- в результате оперативной «прикидки» трубопроводов совместно всеми задействованными подразделениями завода и проектного бюро удалось бы избежать задержки обсуждения и решения ситуации в четвертом помещении;
- установка на компьютеры подразделений завода программного обеспечения разрешила бы множество конфликтов при просмотре электронной модели, созданной в проектном бюро, до выполнения на заказе;
- передача информации о корректировке ЭД в конструкторское бюро в электронном виде обеспечила бы помощь оперативной группе, находящейся на заводе в период загруженности в связи с высоким процентом готовности заказа.

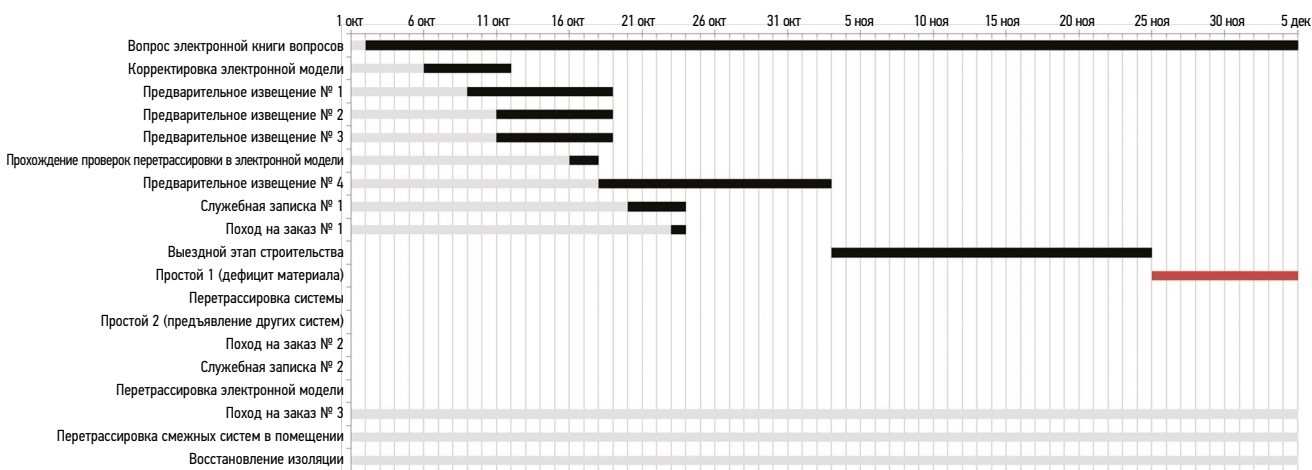


Рис. 2. Первый этап решения вопроса.
Fig. 2. The first stage of solving the issue.

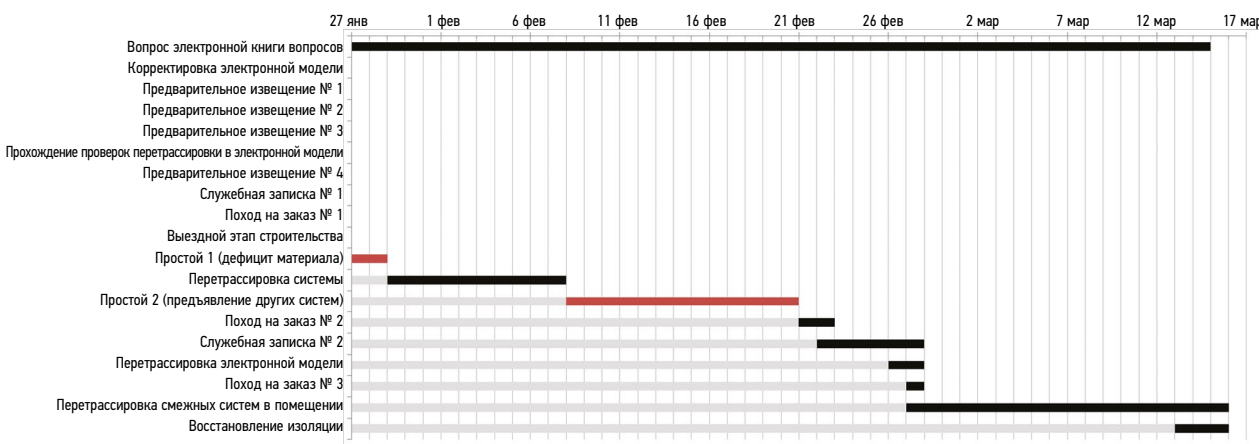


Рис. 3. Второй и третий этапы решения вопроса.
Fig. 3. The second and the third stages of solving the issue.

Так как данные о постройке судостроительных объектов запрещено передавать через социальные сети, а ЭД корректируется на заводе вручную, то в первую очередь необходимым шагом является проработка передачи сведений о корректировке ЭД в рамках электронного оборота между заводом и проектным бюро. Преимуществом информационных технологий, а именно возможности ведения электронного хранилища изменений документации, является ускорение процесса работы конструктора с документацией и ее обработки [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ источников литературы в области судостроения показал, что обобщенная информация по методам сокращения потерь трудоемкости на строящихся заказах в открытом доступе отсутствует. Проблема потерь трудоемкости из-за импортозамещения встречается нечасто, однако требует длительного времени для решения. Выше представленная хронология решения вопроса электронной книги показывает, что несвоевременное отражение изменений в техническом описании системы и сборочных чертежах системы серьезно отражаются на закрытии УП и УШ в частности и сроках строительства судостроительного заказа в целом. Вероятность возникновения подобных ситуаций на головном заказе довольно высока, однако обсуждение возникшей ситуации в рамках производственных совещаний позволит избежать повторных потерь. Анализ результатов производственного эксперимента привел к составлению рекомендации для автоматизации работы группы технического сопровождения, подразделений завода и проектного бюро.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаева А.Б. Ледокольный атомный флот как фактор развития Северного морского пути // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2022. Т. 25, № 3. С. 158–170. doi: 10.37614/2220-802X.3.2022.77.011 EDN: RXRSIQ
2. Бурмистров Е.Г., Михеева Т.А. Организация подготовки производства на судостроительном предприятии. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2024. 168 с.
3. Мовчанова М.Д., Недорезанюк А.С., Ровдо А.В., и др. Анализ причин непроизводственных потерь трудоемкости // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2024. № 2. С. 63–72. EDN: BJQYWC

REFERENCES

1. Nikolaeva AB. Icebreaker atomic fleet as a factor of the northern sea route development. *The north and the market: forming the economic order*. 2022;25(3):158–170. doi: 10.37614/2220-802X.3.2022.77.011 EDN: RXRSIQ
2. Burmistrov EG, Mikhееva TA. *Organization of production preparation at the shipbuilding enterprise*. 2nd ed. Saint Petersburg: Lan; 2024. 168 p. (In Russ.)
3. Movchanova MD, Nedorezanyuk AS, Rovdo AV, et al. Analysis of the causes of non-production losses of labor intensity. *SMTU Transactions*. 2024;(2):63–72. EDN: BJQYWC

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: М.Д. Мовчанова — написание текста, разработка концепции, анализ полученных данных при эксперименте; А.С. Недорезанюк — руководство проведением производственного эксперимента; В.В. Трусов — оформление рисунков; А.Б. Фомичев — редактирование текста, разработка концепции, составление выводов.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: M.D. Movchanova, writing the text, developing the concept, analyzing the data obtained during the experiment; A.S. Nedorezanyuk, conducting the production experiment; V.V. Trusov, designing drawings; A.B. Fomichev, editing the text, developing the concept, drawing conclusions.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

4. Алексашин А.А., Половинкин В.Н. Современное состояние и перспективы развития ледового судостроения и судоходства // Арктика: экология и экономика. 2015. № 1. С. 18–30. EDN: TUUTKB
5. Мовчанова М.Д., Беляков Н.А., Недорезанюк А.С., и др. Оптимизация судостроительного производства путем внедрения альбомов труб // Морской вестник. 2024. № 1. С. 24–26. doi: 10.56192/18123694_2024_1_24 EDN: HQCLTK
6. Уткин В.Е., Багаев Г.В., Козлов А.В. Использование новых форм представления информации при строительстве и эксплуатации кораблей и судов // Судостроение. 2009. № 1. С. 46–49. EDN: JWWHCH

4. Alecsashin AA, Polovinkin VN. Current state and prospects of arctic shipbuilding and navigation. *Arctic: ecology and economy*. 2015;(1):18–30. EDN: TUUTKB
5. Movchanova MD, Belyakov NA, Nedorezanyuk AS, et al. Optimization of shipbuilding production by implementation of pipe albums. *Marine Bulletin*. 2024;(1):24–26. doi: 10.56192/18123694_2024_1_24 EDN: HQCLTK (In Russ.)
6. Utkin BE, Bagaev GV, Kozlov AV. Application of new forms of data representation when building and using naval and civil ships. *Shipbuilding*. 2009;(1):46–49. EDN: JWWHCH

ОБ АВТОРАХ

***Марина Дмитриевна Мовчанова**, аспирант;
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3;
eLibrary SPIN: 6041-1340; e-mail: movchanova.m@yandex.ru

Алексей Сергеевич Недорезанюк, ведущий инженер-технолог;
e-mail: nedorezanyuk.as@ashipyards.com

Василий Владимирович Трусов, начальник участка цеха;
e-mail: trusov.vv@ashipyards.com

Андрей Борисович Фомичев, д-р техн. наук,
профессор кафедры технологии судостроения;
e-mail: fomichev61@mail.ru

AUTHORS' INFO

***Marina D. Movchanova**, PhD student;
address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia;
eLibrary SPIN: 6041-1340; e-mail: movchanova.m@yandex.ru

Aleksey S. Nedorezanyuk, Leading process engineer;
e-mail: nedorezanyuk.as@ashipyards.com

Vasiliy V. Trusov, Head of the workshop section;
e-mail: trusov.vv@ashipyards.com

Andrei B. Fomichev, Dr. Sci. (Engineering),
Professor at the Department of Shipbuilding Technology;
e-mail: fomichev61@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 681.883

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_61

Оригинальное исследование

Исследование системы управления движением безэкипажного катера

Е.Р. Филиппова, Ю.В. Ясинская

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследование системы управления движением безэкипажного катера актуально благодаря своему потенциалу для повышения экономической эффективности, безопасности и экологичности морской индустрии. Развитие таких технологий соответствует глобальным трендам цифровизации и автоматизации, а также стратегическим интересам государства. Исследование в этой области способствует созданию инновационных решений, которые могут быть применены в различных отраслях, от логистики до национальной безопасности.

Цель. В статье рассматриваются характеристики системы управления движением безэкипажного катера, разработка структурной схемы моделирования управляемого движения, а также получение результатов, которые могут быть использованы при проектировании конкретного безэкипажного катера.

Методы. В рамках исследования были использованы линейные и нелинейные функции управления движением катера, а также разработаны и преобразованы в структурные схемы математические модели.

Результаты. В процессе работы проанализированы характеристики системы управления безэкипажного катера.

Выводы. В результате исследования были разработаны математические модели системы управления движением безэкипажного катера, которые могут быть использованы при проектировании конкретного безэкипажного катера.

Ключевые слова: система управления; безэкипажный катер; математические модели.

Как цитировать

Филиппова Е.Р., Ясинская Ю.В. Исследование системы управления движением безэкипажного катера // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 61–68. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_61

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_61

Original study article

Study of motion control system of unmanned boat

Ekaterina R. Filippova, Yulia V. Yasinskaya

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The study may improve the viability, safety, and environmental friendliness of the maritime industry. The development of such technologies is in line with global digital transformation and automation trends and the strategic interests of the State. Research in this area helps develop innovative solutions applicable in various industries—from logistics to national security.

AIM: The article discusses the parameters of the motion control system of an unmanned boat, the development of an unmanned boat controlled movement simulation diagram, and how results that may be used to design a specific unmanned boat are achieved.

METHODS: The authors used linear and nonlinear functions to control the boat's motion, developed and transformed mathematical models into structural diagrams.

RESULTS: The authors analyze parameters of the unmanned boat control system as part of the study.

CONCLUSIONS: The study resulted in the development of mathematical models of the unmanned boat motion control system used to design a specific unmanned boat.

Keywords: control system; unmanned boat; mathematical models.

To cite this article

Filippova ER, Yasinskaya YuV. Study of motion control system of unmanned boat. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):61–68. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_61

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

Во многих странах, в том числе и в Российской Федерации, был разработан целый ряд безэкипажных катеров (БК), которые могут улучшить безопасность на море, облегчить выполнение различных задач и снизить риски для людей, работающих на судах и катерах. Однако необходимо учитывать все сложности, связанные с автоматическими системами, и проводить их тестирование и обучение перед широким внедрением в жизнь.

Кроме того, БК могут быть использованы для выполнения различных силовых операций, в том числе разведывательных, противодиверсионных, контртеррористических, антисаботажных и других задач. Они способны быстро реагировать на изменения обстановки и поддерживать свои позиции на большом расстоянии от базы (рис. 1).

Безэкипажные катера становятся все более популярными в различных сферах, от научных исследований до военных операций. Основным элементом их управления и функциональности служат современные датчики и оборудование, которые обеспечивают автономность и безопасность эксплуатации [1].

Среди ключевых датчиков можно выделить системы глобального позиционирования (GPS), которые обеспечивают точное определение местоположения и маршрутную навигацию без участия человека. Лидары и радары используются для обнаружения препятствий и мониторинга окружающей среды, что позволяет оснащенным катерам маневрировать в сложных условиях.

Кроме того, датчики, отвечающие за сбор данных о воде (температура, соленость, скорость течения), играют важную роль в научных исследованиях морских экосистем. Интеграция камер и других сенсоров позволяет проводить видеонаблюдение и мониторинг, что актуально как для охраны окружающей среды, так и для обеспечения безопасности судоходства.

Таким образом, современные технологии делают БК высокотехнологичными и многофункциональными инструментами, открывая новые горизонты для применения в различных областях (рис. 2).



Рис. 2. Катер-дрон на базе «Визира» от Кингисеппского машиностроительного завода (Холдинг КМЗ может поставить армии катера-дроны типа «Визир» // РИА Новости. 11.09.2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20230911/katera-1895436469.html>).
Fig. 2. Drone boat based on Vizir by Kingisepp Machine-Building Plant.



Рис. 1. Безэкипажный катер (Royal Navy taps Autonomous Vehicles. September 11, 2019. Marine Link. URL: <https://www.marinelink.com/news/royal-navy-taps-autonomous-vehicles-470599>).

Fig. 1. Unmanned surface vessel (Royal Navy taps Autonomous Vehicles. September 11, 2019. Marine Link. URL: <https://www.marinelink.com/news/royal-navy-taps-autonomous-vehicles-470599>).

К основным достоинствам БК можно отнести:

- возможность быстрых маневров и изменения направления движения, что повышает эффективность наблюдения и снижает риски для экипажа;
- возможность использования в зонах с высоким риском, таких как зоны боевых действий или места активной добычи ресурсов на морском дне;
- способность работать в погодных условиях, которые могут быть опасными для членов экипажа;
- возможность обеспечения непрерывного мониторинга и сбора данных на больших расстояниях.

Однако, несмотря на все преимущества и перспективы использования БК, они не являются универсальным решением для всех видов деятельности на море. Каждая операция требует комплексного подхода и выбора наиболее эффективных средств выполнения задачи, включая как традиционные корабли, так и БК. На данном этапе развития технологий БК имеют определенные ограничения в возможностях вооружения и наблюдения. Поэтому их применение требует тщательного анализа и оценки в каждом конкретном случае.

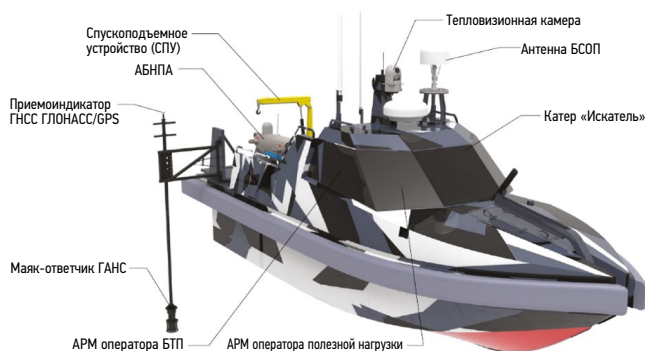


Рис. 3. Автономный безэкипажный необитаемый подводный аппарат «Искатель» (Безэкипажный катер «Искатель» на испытаниях в Кронштадте: bmpd — ЖЖ [Электронный ресурс]. URL: <https://bmpd.livejournal.com/2725709.html>).

Fig. 3. Autonomous unmanned underwater vehicle SKAT (URL: <https://bmpd.livejournal.com/2725709.html>).

Помимо этого, БК может выполнять задачи связанные с обеспечением командования корабля, управлением полетом БПЛА, обнаружением и классификацией объектов на поверхности моря и под водой, а также с целевым наведением вооружения. В общем, БК обеспечивает эффективную работу корабля на море в самых различных условиях и задачах (рис. 3).

Одной из задач БК является мониторинг побережья сложной конфигурации при разработке плана высадки десанта на это побережье. Это позволяет избежать потерь людей и вооружения во время десантирования [2].

Для начала исследования системы управления движением БК требуется указать линейные функции управления БК (табл. 1). Затем на основе полученных расчетов нужно построить структурную схему моделирования управляемого движения БК с использованием линейных функций (рис. 4).

Далее рассмотрим моделирование процесса отображения траектории БК с использованием нелинейных дифференциальных уравнений.

Для отображения траектории БК используем совмещенные системы координат (рис. 5).

Проекции вектора линейной скорости на оси и связанные с ним системы координат:

$$\begin{cases} V_X = \cos(\beta(t)) \\ V_Z = \sin(\beta(t)). \end{cases} \quad (1)$$

Источником переменной $\beta(t)$ является математическая модель объекта управления. Система (1) будет

использоваться при построении математической модели отображения траектории движения БК. Эта модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\xi}{dt} = V_X \cos(\psi(t)) + V_Z \cdot \sin(\psi(t)) \\ \frac{d\zeta}{dt} = -V_X \sin(\psi(t)) + V_Z \cdot \cos(\psi(t)). \end{cases} \quad (2)$$

Для решения системы (2) ее дополняют начальными условиями:

$$\begin{aligned} t &= (0) \\ \zeta(0) &= \zeta_0 \\ \xi(0) &= \xi_0. \end{aligned}$$

Рассмотрим возможные формы записи решения уравнений системы (2). Если использовать решающие элементы аналогового типа, то решение записывается в виде:

$$\begin{cases} \xi(t) = \int_0^t (V(\cos(\beta(t))\cos(\psi(t)) + \sin(\beta(t))\sin(\psi(t))))dt + \xi_0 \\ \zeta(t) = \int_0^t (V(-\cos(\beta(t))\sin(\psi(t)) + \sin(\beta(t))\cos(\psi(t))))dt + \zeta_0. \end{cases} \quad (3)$$

Аналитическая форма записи позволяет сформировать два одномерных массива.

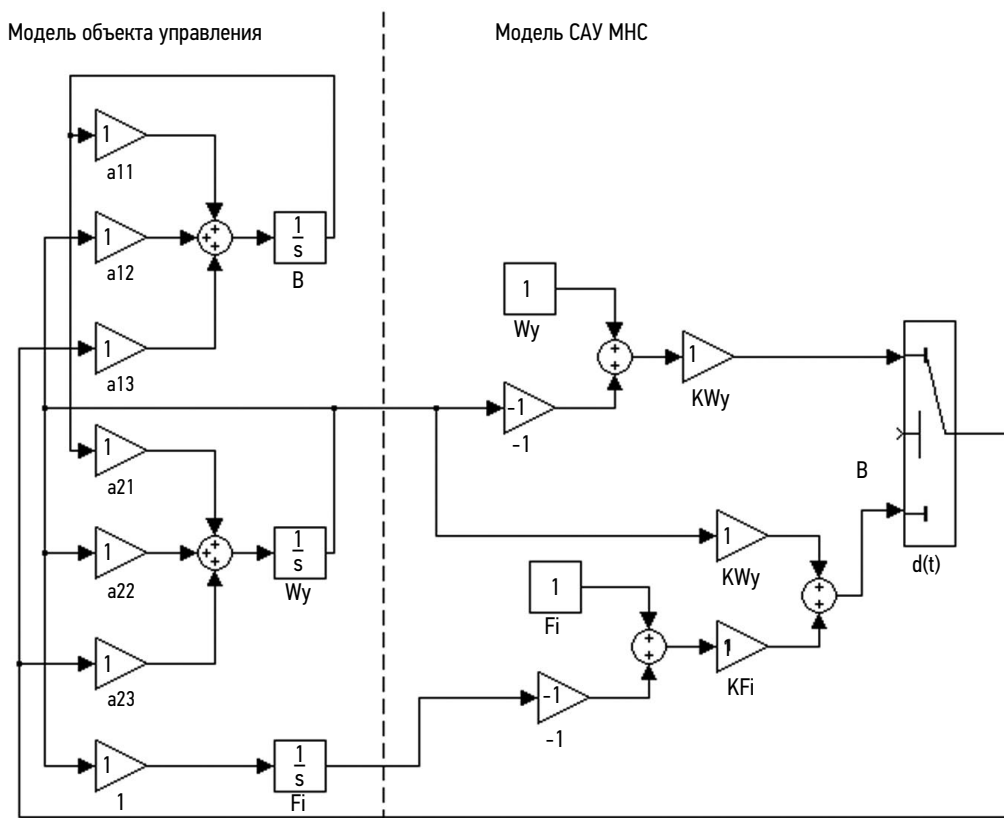


Рис. 4. Структурная схема моделирования управляемого движения безэкипажного катера с использованием линейных функций.
Fig. 4. Structural diagram of the unmanned boat's controlled motion simulated using linear functions.

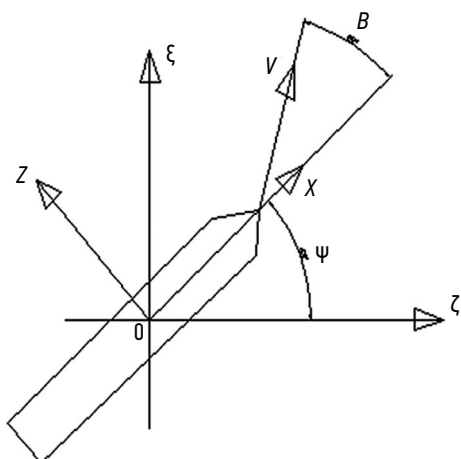


Рис. 5. Совмещенные системы координат: V — вектор линейной скорости, β — угол дрейфа.
Fig. 5. Integrated coordinate systems: V — linear velocity vector, β — drift angle.

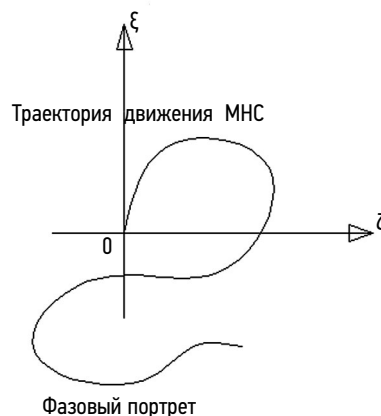


Рис. 6. $\zeta(\xi)$ — траектория движения безэкипажного катера.
Fig. 6. $\zeta(\xi)$ — path of the unmanned boat.

Таблица 1. Линейные функции управления безэкипажного катера
Table 1. Linear control functions of an unmanned boat

№	Вид маневра	Заданные параметры	Измеряемые параметры	Управляющая функция	Параметр, характеризующий качество движения
1	Движение БК по дуге окружности	$\pm\omega_y(1/RAD)$	$\omega_y(t)$	$\delta_B = K_{\omega_y}(\omega_y(t) - \omega_y)$	K_{ω_y} — зависит от качества движения БК
2	Выход БК на задний курс	$\pm\psi(RAD)$	$\psi(t)$	$\delta_B = K_{\psi}(\psi(t) - \psi)$	K_{ψ}
3	Стабилизация БК на заднем курсе	$\pm\psi(RAD)$	$\psi(t), \omega_y(t)$	$\delta_B = K_{\psi}(\psi(t) - \psi) + K_{\omega_y}(\omega_y(t))$	K_{ψ}, K_{ω_y}

Примечание: БК — безэкипажный катер.
Note: БК, unmanned boat.

В качестве альтернативы решения системы (3) используют конечно-разностное представление дифференциальных уравнений системы (2) (рис. 6). Заменяя в системе (2) дифференциал зависимых переменных (1.1), можно систему (2) записать в конечно-разностной форме:

$$\begin{aligned} d\zeta &\approx \zeta_{i+1} - \zeta_i \\ d\xi &\approx \xi_{i+1} - \xi_i \\ dt &\approx \Delta t = h \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} \xi_{i+1} = \xi_i + \Delta t(V \cos(\beta_i) \cos(\psi_i) + \sin(\beta_i) \sin(\psi_i)) \\ \zeta_{i+1} = \zeta_i + \Delta t(V(-\cos(\beta_i) \sin(\psi_i) + \sin(\beta_i) \cos(\psi_i))) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i &= (0) \\ \zeta_0 &= 0 \\ \xi_0 &= 0. \end{aligned}$$

Если скорость БК задана постоянной, то для решения системы (4) в качестве источника информации о текущих значениях углов дрейфа и курса выбирают математическую модель объекта управления (рис. 7) [3].

Более наглядным способом представления процесса решения является разработка структурной схемы моделирования задачи (3). Она включает:

- 1) источник входных данных ($\beta(t)$ и $\psi(t)$);
- 2) датчик скорости БК (V);

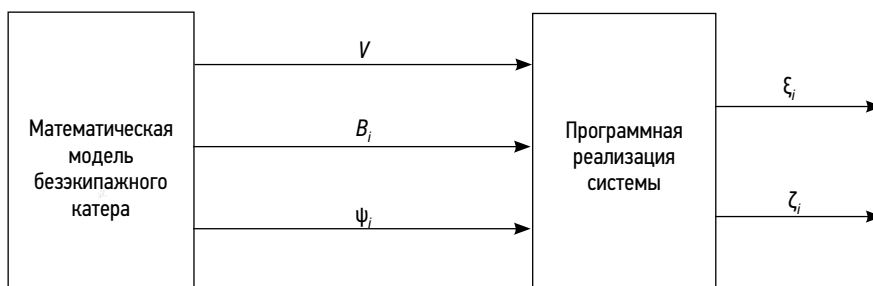


Рис. 7. Структура связи модели безэкипажного катера и отображения его траектории.
Fig. 7. Connection between the unmanned boat model and its path map.

3) совокупность линейных и нелинейных решающих элементов для реализации подынтегральных функций в выражениях (3);

4) средства графического отображения результатов решения системы (3).

Для исследования модели управляемого движения объекта БК при различных режимах его маневрирования необходимо преобразовать модель к виду, адекватному используемому инструменту моделирования.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\beta(t)}{dt} &= a_{11}\beta + a_{12}\omega_y(t) + a_{13}\delta_\beta(t) \\ \frac{d\omega_y(t)}{dt} &= a_{21}\beta + a_{22}\omega_y(t) + a_{23}\delta_\beta(t) \\ \frac{d\psi}{dt} &= \omega_y(t) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{модель} \\ \text{объекта} \\ \text{управления} \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_\beta &= \delta_{\beta\max} \text{SIGN}(K_\psi(\psi(t) - \psi) + K_{\omega_y}\omega_y(t)) \\ \frac{d\xi(t)}{dt} &= V(\cos(\beta(t)\cos(\psi(t)) + \sin(\beta(t)\sin(\psi(t)))) \\ \frac{d\zeta}{dt} &= V(-\cos(\beta(t)\sin(\psi(t)) + \sin(\beta(t)\cos(\psi(t)))) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{модель системы} \\ \text{управления} \\ \text{траектории} \\ \text{МНС} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_\beta(t) &= K_\psi(\psi(t) - \psi) + K_{\omega_y}\omega_y(t) \\ \beta(t) &= \int_0^t (a_{11}\beta(t) + a_{12}\omega_y(t) + a_{13}\delta_\beta(t))dt + \beta_0 \\ \omega_y(t) &= \int_0^t (a_{21}\beta(t) + a_{22}\omega_y(t) + a_{23}\delta_\beta(t))dt + \omega_{y0} \\ \psi(t) &= \int_0^t \omega_y(t)dt + \psi_0 \\ \xi(t) &= \int_0^t (V(\cos(\beta(t)\cos(\psi(t)) + \sin(\beta(t)\sin(\psi(t))))dt + \xi_0 \\ \zeta(t) &= \int_0^t (V(-\cos(\beta(t)\sin(\psi(t)) + \sin(\beta(t)\cos(\psi(t))))dt + \zeta_0 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \zeta_0 &= \zeta(t) \\ \xi_0 &= \xi(t) \\ t &= t_k. \end{aligned}$$

Таким образом, структура модели для реализации системы будет выглядеть следующим образом (рис. 8).

Используя измеряемые параметры нелинейных функций управления движением БК при моделировании сложных траекторий, реализуемых БК, можно получить структурную схему моделирования с нелинейными

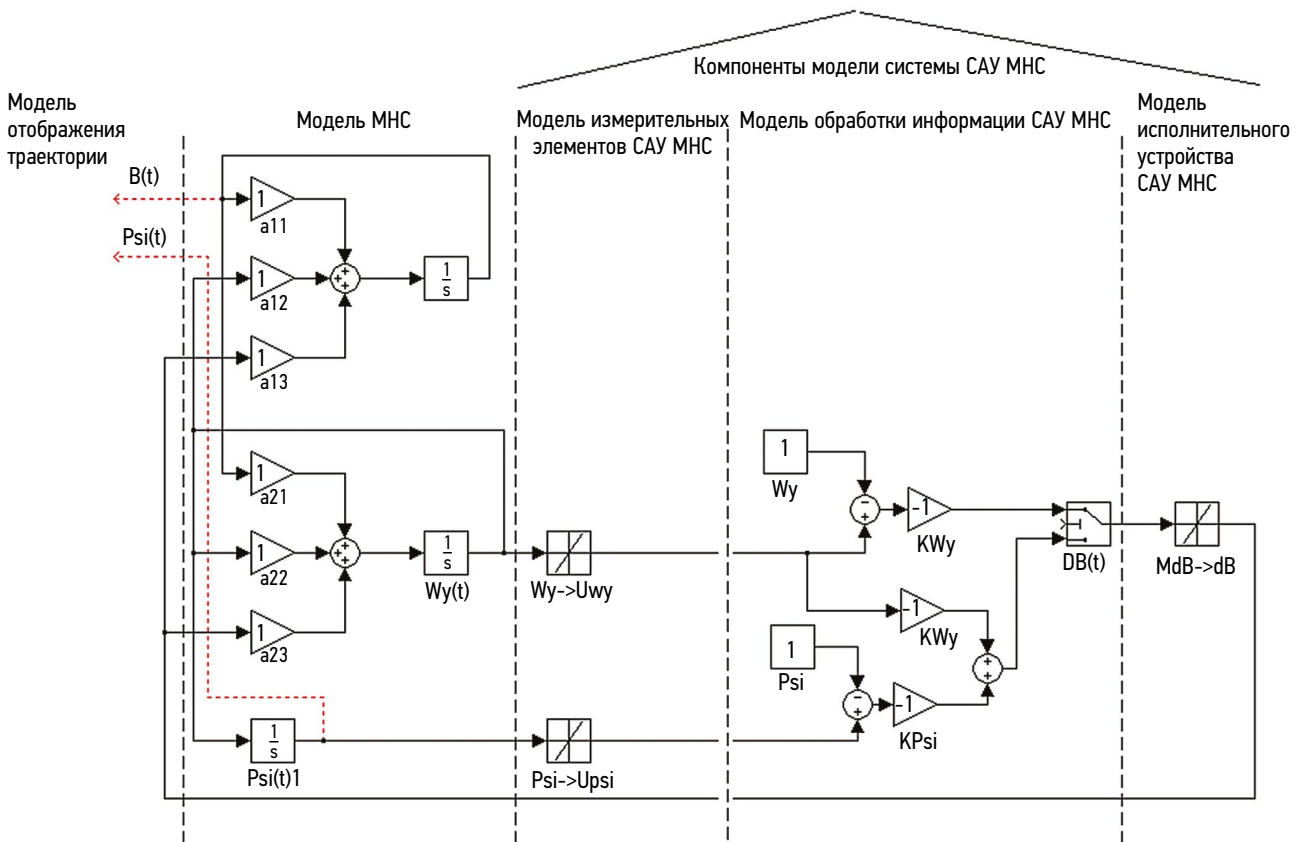


Рис. 8. Структура модели для реализации системы.
Fig. 8. Model structure for system implementation.

статическими характеристиками измерителей информации о курсе и угловой скорости БК, а также следующие результаты исследования модели системы управления движением БК (рис. 9 и 10) [4].

ВЫВОД

Разработаны математические модели системы управления движением БК. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании конкретного БК.

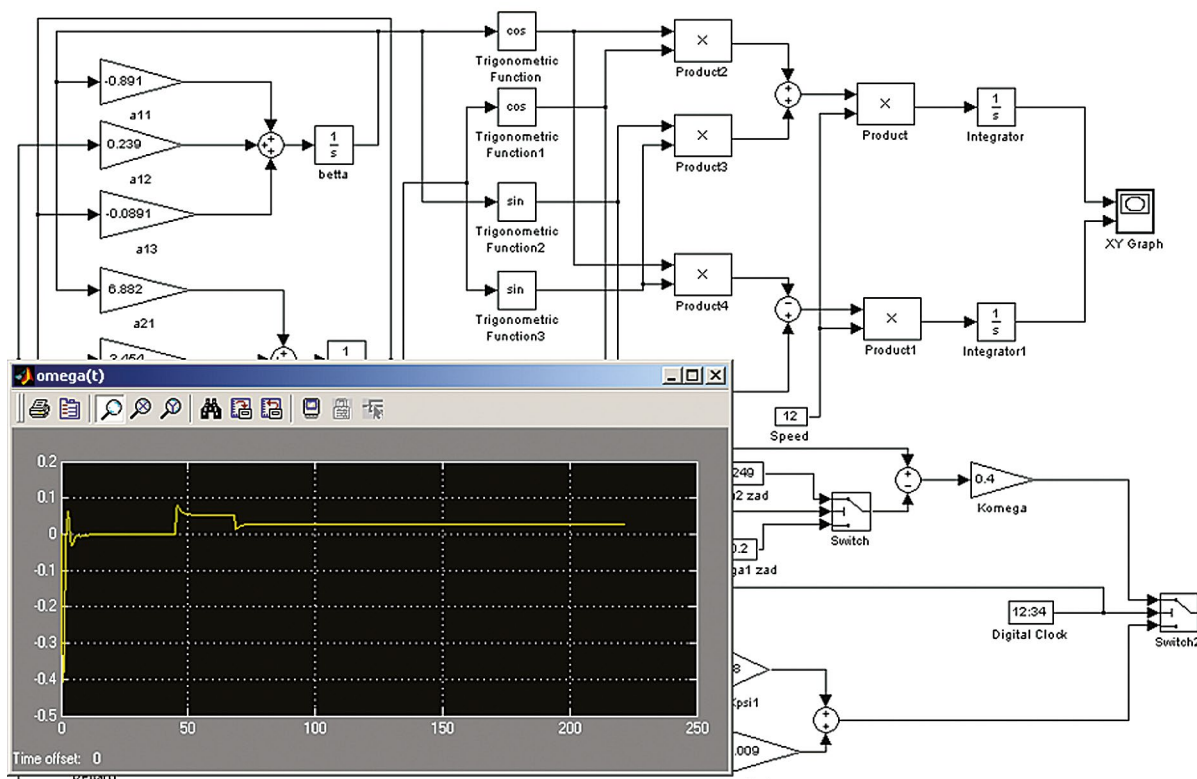


Рис. 9. Переходный процесс по угловой скорости безэкипажного катера.
Fig. 9. Unmanned boat rotation speed transient process.

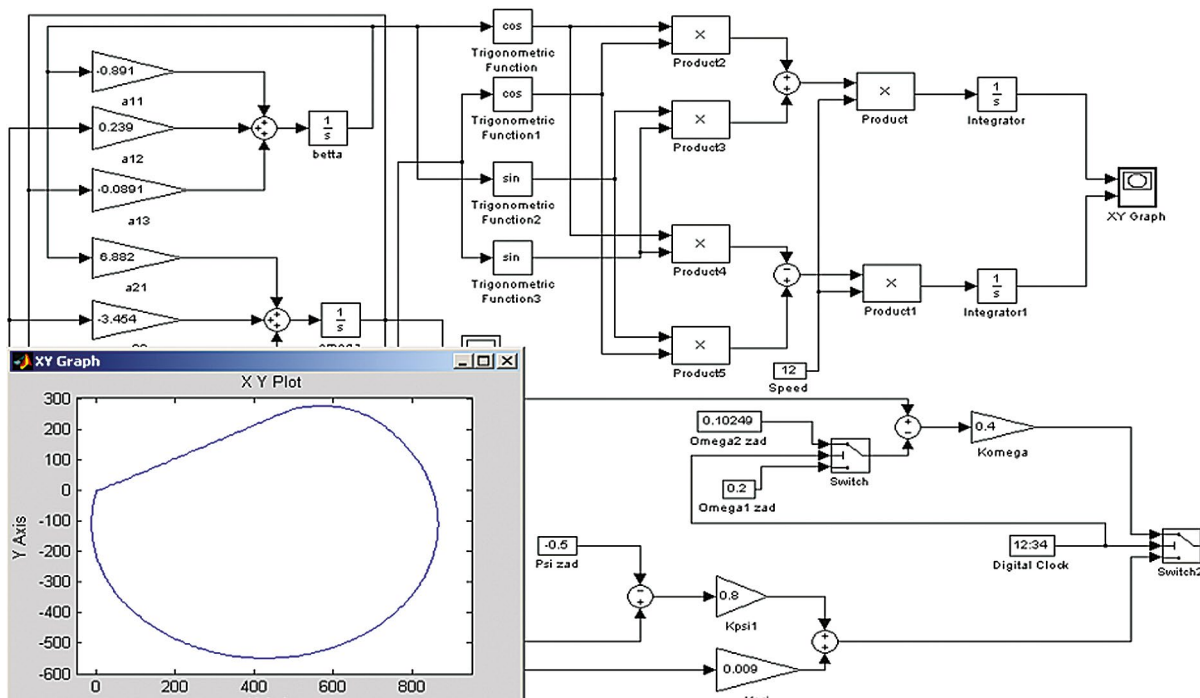


Рис. 10. Траектория безэкипажного катера по обследованию экстремального объекта.
Fig. 10. Unmanned boat path for examination of an extreme object.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: Е.К. Филиппова — разработка концепции, проведение исследования, визуализация; Ю.В. Ясинская — редактирование текста, утверждение окончательного варианта, ресурсное обеспечение исследования.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: E.R. Filippova, concept development, study implementation, visualization; Yu.V. Yasinskaya, text editing, approval of the final version, resource support of the study.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трушенков В.В., Кабанов А.И., Сударчиков В.А., и др. Состояние и перспективы развития безэкипажных катеров. Предложения в концепцию развития и применения безэкипажных катеров ВМФ России. Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «Морское подводное оружие — Гидроприбор», 2016.
2. Пинский А.С. E-навигация и безэкипажное судовождение // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2016. № 4. С. 50–54. EDN: WMAHYT

3. Круглеевский В.Н., Денисов В.И. Особенности развития, задачи и состав комплекса «Безэкипажный роботизированный катер» // Судостроение. 2013. № 5. С. 23–25. EDN: REACTH
4. Шмаков А.С., Викторов Р.В., Корнилов Н.А. Малые формы подводной робототехники на безэкипажных катерах, их спускоподъемные и пусковые устройства // Научноёмкие технологии. 2020. № 7. С. 22–31. doi: 10.18127/j19998465-202007-03 EDN: WJQCAG

REFERENCES

1. Trushenkov VV, Kabanov AI, Sudarchikov VA, et al. *Status and prospects of development of crewless boats. Proposals to the concept of development and application of crewless boats of the Russian navy.* Saint Petersburg: SSC RF JSC "Concern 'Marine Underwater Weapons — Hydropribor"; 2016. (In Russ.)
2. Pinskiy AS. E-navigation and unmanned ship navigation. *Transport of the Russian Federation.* 2016;(4):50–54. EDN: WMAHYT

3. Krugleyevsky VN, Denisov VI. Special features, task and composition of «unmanned robotic boat». *Shipbuilding.* 2013;(5):23–25. EDN: REACTH
4. Shmakov AS, Viktorov RV, Kornilov NA. Small forms of roboticist at unmanned surface vessels, its launch and recovery systems (devices). *Science intensive technologie.* 2020;(7):22–31. doi: 10.18127/j19998465-202007-03 EDN: WJQCAG

ОБ АВТОРАХ

***Екатерина Романовна Филиппова**, магистр;
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3;
e-mail: ERFilippova@yandex.ru

Юлия Владимировна Ясинская, канд. техн. наук, доцент
кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники; e-mail: yasinskaya.spb@mail.ru

AUTHORS' INFO

***Ekaterina R. Filippova**, Master's Degree student;
address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia;
e-mail: ERFilippova@yandex.ru

Yulia V. Yasinskaya, Cand. Sci. (Engineering), Associate
Professor at the Department of Automatic Control Systems and
On-board Computer Technology; e-mail: yasinskaya.spb@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 621.039.52.034.6

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_69

Научный обзор

Анализ применения комплексной математической модели к проектированию ЯЭУ с ЖМТ

А.А. Горбачев, А.А. Иванов

Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

В настоящей статье рассматриваются вопросы создания и отработки алгоритмов управления ядерной энергетической установкой с использованием комплексных математических моделей, которые позволяют исследовать работу ядерной энергетической установки в различных динамических режимах, особенно на режимах пуска и расхолаживания, учитывая изменение агрегатного состояния жидкометаллического теплоносителя.

Цель работы состояла в обзоре опыта эксплуатации ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем и оценка применения комплексных математических моделей.

Проведен анализ литературы и интернет-ресурсов по выбранной теме.

В результате выполненных в последние годы исследовательских и научных работ подготовлена научно-техническая база для создания нового поколения ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем на инновационных решениях, обладающих повышенной ядерной и радиационной безопасностью, надежностью, улучшенными массогабаритными и эксплуатационными характеристиками. Для опережающей отработки ядерной энергетической установки и проведения комплексных испытаний и исследований до начала их серийного производства необходимо создавать комплексные математические модели. Каждый эксперимент с ядерной энергетической установки сначала отрабатывается на компьютерной модели. Это позволяет безопасно и с малыми затратами исследовать поведение реактора на различных режимах, включая аварийные, для последующей отработки алгоритмов управления.

Ключевые слова: ядерная энергетическая установка; жидкометаллический теплоноситель; математическое моделирование.

Как цитировать

Горбачев А.А., Иванов А.А. Анализ применения комплексной математической модели к проектированию ЯЭУ с ЖМТ // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 69–74. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_69

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_69

Review

Analysis of using complex mathematical models to design nuclear power plants with liquid metal coolant

Aleksandr A. Gorbachev, Aleksandr A. Ivanov

Saint Petersburg Marine Engineering Bureau «Malachite», Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

This article examines the development of control algorithms for nuclear power plants using complex mathematical models that allow for studying the operation of a nuclear power plant in various dynamic modes, especially during start-up and cooldown. The models are based on the change in the physical state of the liquid metal coolant.

The article reviews the operating experience of nuclear power plants with liquid metal coolant and the application of complex mathematical models. Analysis of papers and online resources on the topic. Recent research has been used as a science and technology base for the development of a new generation of nuclear power plants with liquid metal coolant based on innovative solutions with increased nuclear and radiation safety, reliability, and improved weight, dimensional and operational parameters. To develop a nuclear power plant ahead of schedule and conduct comprehensive tests and research before its large-scale production, it is required to develop comprehensive mathematical models. Every experiment with a nuclear power plant is first tested on a computer model. This allows for safe and low-cost research of the reactor's behavior in various modes, including emergency, for further development of control algorithms.

Keywords: nuclear power plant; liquid metal coolant; mathematical simulation.

To cite this article

Gorbachev AA, Ivanov AA. Analysis of using complex mathematical models to design nuclear power plants with liquid metal coolant. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):69–74. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_69

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 25.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире наблюдается растущий интерес к ядерным энергетическим установкам (ЯЭУ) с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ). Следует отметить, что реактор на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ) признан одной из шести перспективных реакторных технологий, предлагаемых в рамках международного проекта «Generation-IV International Forum» (GIF) в качестве основы ядерной энергетики будущего. Программа «Generation-IV», впоследствии преобразованная в крупный международный проект GIF, создана в 2000 г. с целью организации международного сотрудничества по разработке перспективных ядерных энергетических систем и установок четвертого поколения. В составе участников проекта GIF Аргентина, Канада, Франция, Япония, Республика Корея, ЮАР, Великобритания, США, Китай и Россия.

В нашей стране после вывода из эксплуатации последней АПЛ проекта 705К в 1997 г. не осталось действующих ЯЭУ с СВТ. Разрабатывавшиеся в конце восьмидесятых годов прошлого века проекты ЯЭУ с ЖМТ на практике реализованы не были.

На сегодняшний день в России вновь активно ведутся работы по реализации проектов ЯЭУ с данным типом теплоносителя. Реализуются проекты таких энергетических реакторов с СВТ, как СВБР-100, БРЕСТ-ОД-300 [1].

Целесообразность использования эвтектического сплава свинец-висмут (РЬ ~44 %, Вн ~56 %) в качестве теплоносителя обусловлена его физико-химическими и термодинамическими свойствами, позволяющими в наиболее полной степени удовлетворить требованиям, предъявляемым к паропроизводящим установкам (ППУ)

в составе транспортных ЯЭУ. Особенно это касается массогабаритных характеристик, маневренности и безопасности [2].

Невысокая температура плавления СВТ (~125 °С) обеспечивает возможность ремонта оборудования и перегрузки топлива без дренирования, при поддержании его в жидком состоянии при температуре 160–180 °С за счет работы системы обогрева теплоносителя.

Решение об использовании транспортных ЯЭУ с ЖМТ может быть принято по результатам конкурсного проектирования установок с различными типами ЯЭУ с учетом испытаний и эксплуатации наземных стендов-прототипов.

Научно-технический задел, накопленный при освоении ЯЭУ с ЖМТ для АПЛ, позволил создать базу для разработки инновационной реакторной свинцово-висмутовой технологии, удовлетворяющей требованиям к реакторам XXI в. [2].

ПРОБЛЕМА «ЗАМОРАЖИВАНИЯ — РАЗМОРАЖИВАНИЯ» ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В 1958 г. первая отечественная ЯЭУ с ЖМТ (стенд «27/ВТ») была выведена на энергетический режим работы. Стенд «27/ВТ» представлял собой наземный прототип ППУ АПЛ проекта 645 [3, 4]. По результатам эксплуатации стенда «27/ВТ» в 1959 г. на Северном машиностроительном предприятии состоялась закладка первой и единственной АПЛ проекта 645 «К-27», изображенной на рис. 1 [3].

При эксплуатации АПЛ проекта 645 важной практической проблемой явилось обоснование возможности многократного «замораживания — размораживания» СВТ, что могло потребоваться при длительных выводах АПЛ из эксплуатации. Исключению повреждения ППУ



Рис. 1. Атомная подводная лодка проекта 645 (URL: <http://atominfo.ru>, публикация «ОКБ ГИДРОПРЕСС отмечает 70-летний юбилей»)
Fig. 1. Nuclear submarine Project 645 (URL: <http://atominfo.ru>, see GIDROPPRESS Research Facility Celebrates Its 70th Anniversary).

при переходе СВТ из жидкого в твердое состояние и дальнейшем его охлаждении до температуры окружающей среды способствуют небольшая усадка СВТ при затвердевании и достаточно высокая пластичность при низкой прочности в твердом состоянии. Для безопасного «размораживания» ППУ был отработан специальный регламент температурно-временного режима разогрева, проверенный на крупномасштабных моделях и ППУ правого борта АПЛ проекта 645 после ее длительного пребывания в «замороженном» состоянии. Однако этот режим не был внедрен в практику в связи с принятым в середине 90-х гг. решением о прекращении дальнейшей эксплуатации АПЛ этого типа [2].

На первом этапе освоения ППУ с ЖМТ была применена паровая система обогрева РУ, что в итоге привело к существенным сложностям при монтаже и эксплуатации установки, снижало ее надежность и делало практически невозможным ввод в действие ЯЭУ после затвердевания теплоносителя в трубопроводах.

Нужно сказать, что свойство СВТ затвердевать при 125 °С в некоторых случаях играло и положительную роль. Например, при хранении отработанного «замороженного» СВТ формируется дополнительный защитный барьер на пути выхода радиоактивности в окружающую среду.

В дальнейшем опыт, полученный при эксплуатации АПЛ «К-27», был использован при создании АПЛ следующего поколения. Для отработки и испытаний ППУ был построен наземный стенд-прототип «КМ-1» и семь АПЛ с ППУ с СВТ по проектам 705 и 705К [1], одна из которых изображена на рис. 2.

Основным недостатком ЯЭУ с ЖМТ следующего поколения явилось наличие сложного и громоздкого берегового комплекса, в который должны были входить специальная котельная для поддержания сплава ЖМТ в жидком состоянии и электроподстанция,

обеспечивающая корабль электропитанием с нестандартными электротехническими характеристиками (по частоте и напряжению).

Теплообмен в жидких металлах имеет свои особенности, в значительной степени обусловленные их высокой теплопроводностью и, соответственно, низким значением числа Прандтля. При низких значениях числа Прандтля понятие теплового пограничного слоя, который в данном случае распространяется до центра канала, теряет смысл. При изучении теплообмена жидких металлов, прежде всего, в области теплоотдающей поверхности следует учитывать поведение примесного состава жидкометаллического теплоносителя у поверхностей его циркуляции для номинального режима и при отклонениях от режима нормальной эксплуатации, а также осуществлять контроль за его состоянием [4].

Таким образом, оптимальному решению вопросов создания и отработки алгоритмов разогрева и охлаждения СВТ, с учетом особенностей гидродинамики и теплообмена в жидкометаллических теплоносителях, должно способствовать создание комплексных математических моделей, которые позволили бы исследовать работу ЯЭУ с ЖМТ в различных динамических режимах, особенно на режимах пуска и расхолаживания, учитывая изменение агрегатного состояния СВТ.

Также стоит отметить, что использование электрической системы обогрева теплоносителя вместо паровой значительно снизит требования, предъявляемые к береговым системам обеспечения.

Таким образом, для опережающей отработки транспортных ЯЭУ и проведения комплексных испытаний и исследований до начала их серийного производства необходимо создавать комплексные математические модели. Каждый эксперимент с ЯЭУ сначала должен быть отработан на компьютерной модели. Это позволит безопасно



Рис. 2. Атомная подводная лодка проекта 705К (URL: <http://atominfo.ru>, публикация «ОКБ ГИДРОПРЕСС отмечает 70-летний юбилей»).

Fig. 2. Nuclear submarine Project 705K (URL: <http://atominfo.ru>, see GIDROPRESS Research Facility Celebrates Its 70th Anniversary).

и с малыми затратами исследовать поведение СВТ на таких режимах, как пуск и расхолаживание, для последующей отработки алгоритмов «замораживания — размораживания» теплоносителя.

Созданная теплогидравлическая математическая модель должна использоваться для последующей разработки и отладки алгоритмов управления в составе системы управления.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ОТЛАДКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЯЭУ

В процессе создания комплексных систем управления технических средств транспортных ЯЭУ следует учитывать опыт разработки цифровых систем последних заказов и, в частности, необходимость сокращения сроков стендовых, швартовых и ходовых испытаний за счет уменьшения объема доработок функционального программного обеспечения (ФПО), непосредственно реализующего алгоритмы управления в штатной аппаратуре. В настоящее время, когда программное обеспечение системы управления проходит отладку и настройку на испытательном стенде или работающем объекте, издержки тестовой эксплуатации считаются неизбежными.

Наиболее рациональное решение постулируемых проблем — использование технологий, которые, с одной стороны, должны быть совместимы с существующими и не приводить к их кардинальному изменению, а с другой — обеспечить повышение качества алгоритмов и ФПО [5]. Основное направление повышения качества — это автоматизация всего комплекса работ по созданию ФПО с отработкой алгоритмов управления на комплексных математических моделях объекта до поставки аппаратуры системы обогрева СВТ на заказ.

Комплект аппаратуры функционирует во взаимодействии с имитатором объекта управления, в качестве которого используется математическая модель, созданная с помощью различных инструментально-программных средств. Соответственно, повышение качества ПО приведет к значительному уменьшению объема отладочных работ при подготовке и проведении межведомственных и приемосдаточных испытаний.

Существенное повышение качества алгоритмов управления и контроля может быть достигнуто на основе автоматизации работ по созданию ПО с отработкой алгоритмов на комплексных динамических математических моделях объекта до поставки аппаратуры системы управления на заказ, а впоследствии — при внесении модификаций и корректировок в ПО. Целесообразность такого подхода была отмечена академиком В.А. Василенко более

двадцати лет назад в работах по сквозной интеграции технологии создания систем управления ЯЭУ, и с тех пор такие предприятия, как ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», АО «Концерн «НПО Аврора», АО «ОКБМ Африкантов» и АО «СПМБМ «Малахит», ведут работы в данном направлении.

Математические модели помогают понять процессы, устанавливая качественные и количественные характеристики их состояний и предсказать динамику интересующих в данных процессах характеристик. Это, в свою очередь, неизбежно связано с необходимостью исследования допустимости различных режимов работы, оценки, отработки алгоритмов управления и прогнозирования технического состояния. При этом особого внимания требует моделирование потенциально опасных переходных режимов, таких как пуск и расхолаживание ЯЭУ, и процессов, связанных с нарушением нормальных условий эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных в последние годы комплексов НИР и ОКР подготовлена научно-техническая база для создания нового поколения автоматизированных РУ с ЖМТ на инновационных решениях, обладающих повышенной ядерной и радиационной безопасностью, надежностью, улучшенными массогабаритными и эксплуатационными характеристиками. Разработанные технические решения направлены на устранение недостатков РУ с ЖМТ, выявленных при их эксплуатации в составе выведенных из строя АПЛ.

Для опережающей отработки ЯЭУ и проведения комплексных испытаний и исследований до начала их серийного производства необходимо создавать комплексные математические модели. Каждый эксперимент с ЯЭУ сначала отрабатывается на компьютерной модели. Это позволяет безопасно и с малыми затратами исследовать поведение реактора на различных режимах, включая аварийные, для последующей отработки алгоритмов управления.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: А.А. Горбачев — сбор, анализ и обработка материала, написание текста статьи; А.А. Иванов — редактирование статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author:

A.A. Gorbachev, collection, analysis and processing of material, writing the text of the article; A.A. Ivanov, article editing.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорович Е.Д., Курдюков И.И. Аналитический обзор опыта эксплуатации и современных разработок ядерных энергетических установок средней и малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2 // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. 2020. № 3. С. 9–31. EDN: RHOORV
2. Тошинский Г.И. Атомная энергетическая установка с жидкометаллическим теплоносителем для подводных лодок. В кн.: Роль российской науки в создании отечественного подводного флота / под ред. А.А. Саркисова. Москва: Наука, 2008. С. 600–613.
3. Тошинский Г.И. Первый в мире реактор с теплоносителем свинец-висмут стенд 27/ВТ. Как всё начиналось. В кн.: V Между-

народная конференция: «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2018). Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2019. С. 8–57.

4. Сорокин А.П., Кузина Ю.А. Физическое моделирование гидродинамики и теплообмена в быстрых реакторах с жидкометаллическим теплоносителем // Атомная энергия. 2020. Т. 128, № 5. С. 259–268. EDN: IJNICG

5. Замуков В.В., Курдюков И.И., Разуваев Е.Н. Внедрение сквозной технологии разработки алгоритмов управления сложными техническими системами объектов ВМФ // Судостроение. 2012. № 2. С. 34–39. EDN: OZCTCH

REFERENCES

1. Fedorovich ED, Kurdyukov II. Analytical review of operating experience and modern developments of medium and small power liquid metal cooled nuclear reactors. Part 2 (modern developments). *Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies*. 2020;(3):9–31. EDN: RHOORV
2. Toshinsky GI. Nuclear power plant with liquid-metal coolant for submarines. In: Sarkisov AA, editor. *The role of russian science in the creation of domestic submarine fleet*. Moscow: Nauka; 2008. P. 600–613. (In Russ.)
3. Toshinsky GI. The world's first reactor with lead-bismuth coolant Stand 27/VT. How it all began. In: *V International conferences*

"Heavy liquid-metal coolants in nuclear technologies" (TZhMT-2018). Obninsk: SSC RF-FEI; 2019. P. 8–57. (In Russ.)

4. Sorokin AP, Kuzina YA. Physical modeling of hydrodynamics and heat transfer in liquid-metal cooled fast reactors. *Atomic Energy*. 2020;128(5):259–268. EDN: IJNICG

5. Zamukov VV, Kurdyukov II, Razuvaev EN. Implementation of through technology of developing algorithms for control of naval objects complicated technical systems. *Shipbuilding*. 2012;(2):34–39. EDN: OZCTCH

ОБ АВТОРАХ

***Александр Александрович Горбачев**, инженер-конструктор 1-й категории; адрес: Россия, 196135, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, д. 18; e-mail: Dark1messiah@mail.ru

Александр Александрович Иванов, инженер-конструктор 1-й категории; e-mail: Alekzander-ivanov@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Aleksandr A. Gorbachev**, design engineer, 1st category; address: 18 Frunze street, 196135, Saint Petersburg, Russia; e-mail: Dark1messiah@mail.ru

Aleksandr A. Ivanov, design engineer, 1st category; e-mail: Alekzander-ivanov@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 621.396

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_75

Оригинальное исследование

Обнаружение случайного сигнала на фоне негауссовской помехи при наличии обучающих неидеальных помеховых выборок

Е.К. Самаров

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Довольно часто во многих задачах статистической радиотехники и радиофизики статистические выводы основываются не только на наблюдениях, но и на априорных предположениях об исследуемой ситуации, например, в виде тех или иных распределений в изучаемой модели. Как правило, в работах решается задача объединения независимых каналов обнаружения случайного сигнала на фоне случайной помехи независимой интенсивности в предположении нормальности всех случайных величин.

Цель — обнаружение случайного сигнала на фоне аддитивной помехи с негауссовским характером распределения при наличии обучающих неидеальных помеховых выборок на основе максиминного решающего правила при проверке гипотез.

Материалы и методы. В данной работе аналогичный вопрос исследуется для негауссовских нестационарных случайных величин при наличии обучающих неидеальных помеховых выборок.

Результаты. Задачу обнаружения решали на основе информации $2K$ независимых каналов. При этом в основных K каналах формируются выборки размером n комплексных амплитуд смеси сигнала и помехи, в дополнительных K каналах — выборочные значения помехи. Решение задачи осуществляется на основе максиминного решающего правила для проверки гипотезы H_0 против альтернативы H_1 .

Выводы. Рассмотрен пример обнаружения случайного сигнала на фоне аддитивной негауссовской нестационарной помехи с плотностью распределения вероятностей, описывающейся законом Лапласа.

Ключевые слова: обучающая выборка; априорные предположения; обнаружение сигнала; смесь сигнала и помехи; максимальное решающее правило; сложные параметрические гипотезы; область устойчивости алгоритма.

Как цитировать

Самаров Е.К. Обнаружение случайного сигнала на фоне негауссовской помехи при наличии обучающих неидеальных помеховых выборок // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 75–79. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_75

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_75

Original study article

Detection of a random signal in non-Gaussian noise with non-ideal training interference samples

Evgeny K. Samarov

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: In many problems of statistical radio engineering and radiophysics, statistical conclusions are quite often based on both observations and a priori assumptions about the studied case, e.g. in the form of certain distributions in the studied model. The papers generally solve the problem of combining independent channels used to detect a random signal against a random interference of independent intensity under the assumption of normality of all random variables.

AIM: To detect a random signal against additive non-Gaussian noise with non-ideal training interference samples based on the maximin decision rule used to test assumptions.

MATERIALS AND METHODS: In this paper, a similar issue is studied for non-Gaussian non-stationary random variables with non-ideal training interference samples.

RESULTS: The detection problem is solved based on data from $2K$ independent channels. In this case, n samples of complex amplitudes are made from signal plus noise mixture in primary K channels and sample interference values are derived from auxiliary K channels. The problem is solved using the maximin decision rule to test the H_0 assumption against the alternative H_1 assumption.

CONCLUSIONS: The article reviews an example of detecting a random signal against an additive non-Gaussian non-stationary interference with a probability distribution density described by the Laplace law.

Keywords: training sample; a priori assumptions; signal detection; signal plus noise mixture; maximum decision rule; complex parametric hypotheses; stability region of the algorithm.

To cite this article

Samarov EK. Detection of a random signal in non-Gaussian noise with non-ideal training interference samples. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):75–79. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_75

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Во многих задачах статистической радиотехники и радиофизики статистические выводы основываются не только на наблюдениях, но и на априорных предположениях об исследуемой ситуации, например в виде тех или иных распределений в изучаемой модели [1–4].

В работах [5–8] решается задача объединения независимых каналов обнаружения случайного сигнала на фоне случайной помехи независимой интенсивности в предположении нормальности всех случайных величин. В данных работах аналогичный вопрос исследуется для негауссовских нестационарных случайных величин.

Обнаружение случайного сигнала на фоне аддитивной негауссовской нестационарной помехи

Пусть обнаружение сигнала проводится на основе информации $2K$ независимых каналов. В первых, основных, K каналах формируются выборки размером n комплексных амплитуд смеси сигнала s и помехи $\{y_{i,k}\}$, $i = 1, \dots, n$; $k = 1, \dots, K$. Во вторых, дополнительных, K каналах может быть только помеха с выборочными значениями $\{x_{j,k}\}$, $j = 1, \dots, m$; $k = 1, \dots, K$.

Пусть $x_{i,k}$ и $y_{j,k}$ — комплексные случайные независимые величины с плотностью распределения вероятностей (ПРВ).

$$W(y_{i,k}) = W(|y_{i,k}|, \Delta_k, q_k, \varepsilon_k) = \frac{a_{i,k}}{\varepsilon_k \Delta_k (1 + q_k)} f_{i,k} \left(\frac{|y_{i,k}|}{\sqrt{\varepsilon_k \Delta_k (1 + q_k)}} \right); \quad (1)$$

$$W(x_{j,k}) = W(|x_{j,k}|, \varepsilon_k) = \frac{b_{j,k}}{\varepsilon_k} g_{j,k} \left(\frac{|x_{j,k}|}{\sqrt{\varepsilon_k}} \right). \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon_k > 0$ — неизвестные энергетические параметры выборочных значений помехи, постоянные в каждом канале; $q_k \geq 0$ — параметры, характеризующие энергетические отношения сигнал-помех (ОСП); $\Delta_k \in [\underline{\Delta}, \bar{\Delta}]$ $0 < \underline{\Delta} \leq \bar{\Delta} < \infty$ — параметры неидеальности обучающих помеховых выборок; $a_{i,k}$, $b_{j,k}$ — нормировочные постоянные, больше нуля.

Пусть функции $f_{i,k}(y)$ и $g_{j,k}(y)$ при всех $k = 1, \dots, K$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$ имеют следующие свойства:

А) $\frac{f_{i,k}(y)}{f_{i,k}(\alpha y)}$, $\frac{g_{j,k}(y)}{g_{j,k}(\alpha y)}$ определены и монотонно возрастают при $y \geq 0$ для произвольного $\alpha > 1$;

Б) $f_{i,k}(y)$, $g_{j,k}(y)$ монотонно стремятся к нулю на $[y_0, +\infty)$ для некоторого $y \geq 0$.

Такие свойства имеют ПРВ большого числа распределений: нормального, Коши, Лапласа, гамма-распределения и другие.

Условие Б) обеспечивает существование всех интегралов, которые встречаются в данной работе.

Сформулируем задачу обнаружения сигнала как задачу проверки гипотезы

$$H_0: q_1 = \dots = q_K = 0$$

против альтернативы

$$H_1: q_1 \geq q_0, \dots, q_K \geq q_0,$$

где $q_0 > \frac{\underline{\Delta}}{\bar{\Delta}} - 1$ является границей контролируемой области

ОСП; последнее неравенство разделяет гипотезу и альтернативу.

Построение максиминного решающего правила

Перейдем к построению максиминного решающего правила. Можно ограничиться классом инвариантных относительно изменения масштаба критериев, поскольку в [8] показано существование максиминного решающего правила в этом классе.

Возьмем распределение параметров Δ_k и q_k , сосредоточенных в точках $\bar{\Delta}$ и 0 при гипотезе H_0 и в точках $\underline{\Delta}$ и q_0 при альтернативе H_1 ($k = 1, \dots, K$).

Для такого выбора распределений параметров Δ_k и q_k наиболее мощное решающее правило, инвариантное относительно изменения масштаба, как это следует из [9], имеет вид

$$\psi = \prod_{k=1}^{K\Sigma} \frac{\int_0^\infty \prod_{i=1}^n W(\lambda |y_{i,k}|, \bar{\Delta}, q_0, 1) \prod_{j=1}^m (\lambda |x_{j,k}|, 1) \lambda^{2m-2n-1} d\lambda}{\int_0^\infty \prod_{i=1}^n W(\lambda |y_{i,k}|, \bar{\Delta}, 0, 1) \prod_{j=1}^m (\lambda |x_{j,k}|, 1) \lambda^{2m-2n-1} d\lambda} \geq C \quad (3)$$

$$\Psi = \Psi(|y_1|, \dots, |y_K|, |x_1|, \dots, |x_K|, \bar{\Delta}, \underline{\Delta}, q_0);$$

$$|y_k| = |y_{1k}|, \dots, |y_{nk}|;$$

$$|x_k| = |x_{1k}|, \dots, |x_{mk}|;$$

$$k = 1, \dots, K;$$

C — постоянная, определяемая из соотношения

$$\int_{\psi \geq C} \prod_{k=1}^K \left(\prod_{i=1}^n W(|y_{i,k}|, \bar{\Delta}, 0, 1) \prod_{j=1}^m W(|x_{j,k}|, 1) \right) dx dy = \alpha_0,$$

где α_0 — заданная вероятность ошибки 1-го рода.

Формулировка и доказательства теорем

Теорема 1. Правило (3) является максиминным решающим правилом для проверки гипотезы H_0 против альтернативы H_1 .

В качестве примеров выпишем явный вид правила (3) для некоторых конкретных видов ПРВ:

- для величин, распределенных по нормальному закону $f_{i,k}(y) \equiv g_{j,k}(y) \equiv \exp(-|y|^2)$, для всех i, j, k , получим

$$\Psi = \prod_{k=1}^K \left(\frac{\bar{\Delta}}{\Delta(1+q_0)} \right)^n \left(\frac{\frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n |y_{i,k}|^2 + \sum_{j=1}^m |x_{j,k}|^2}{\frac{1}{\Delta(1+q_0)} \sum_{i=1}^n |y_{i,k}|^2 + \sum_{j=1}^m |x_{j,k}|^2} \right)^{m+n};$$

- для величин, распределенных по закону Лапласа $f_{i,k}(y) \equiv g_{j,k}(y) \equiv \exp(-|y|)$, для всех i, j, k , получим

$$\Psi = \prod_{k=1}^K \left(\frac{\bar{\Delta}}{\Delta(1+q_0)} \right)^n \left(\frac{\frac{1}{\sqrt{\Delta}} \sum_{i=1}^n |y_{i,k}| + \sum_{j=1}^m |x_{j,k}|}{\frac{1}{\sqrt{\Delta(1+q_0)}} \sum_{i=1}^n |y_{i,k}| + \sum_{j=1}^m |x_{j,k}|} \right)^{2m+2n}.$$

Алгоритмы проверки сложных параметрических гипотез в некоторых случаях сохраняют оптимальные свойства для более широкого класса ПРВ по сравнению с тем, для которого они были синтезированы.

Значительный интерес представляет задача определения «области устойчивости» алгоритма, то есть расширенного класса распределений, для которых алгоритмы остаются оптимальными.

Рассмотрим с этой позиции задачу проверки гипотезы H_0 против альтернативы H_1 .

Определение. Инвариантной выпуклой оболочкой (ИВО) семейства вещественно-значных функций $G = \{G_\beta\}_{\beta \in \Omega}$, определенных в B^n , будем называть множество произвольных конечных линейных комбинаций функций из G вида

$$\sum_{s=1}^N \alpha_s(y_1, \dots, y_n) G_\beta(y_1, \dots, y_n); \quad y_i \in B, \beta_s \in \Omega,$$

где N — произвольное натуральное число, α_s — вещественно-значные неотрицательные измеримые по Лебегу функции, такие, что

$$\sum_{s=1}^N \alpha_s(y_1, \dots, y_n) = 1,$$

$$\alpha_s(\lambda y_1, \dots, \lambda y_n) \equiv \alpha_s(y_1, \dots, y_n), \quad \lambda > 0, \quad s = 1, \dots, N.$$

Рассмотрим расширенный класс ПРВ случайных величин $\{y_{i,k}\}$: пусть выборка y_{1k}, \dots, y_{nk} основного канала ($k = 1, \dots, K$; каналы считаем независимыми) представляет собой реализацию комплексной случайной величины, ПРВ которой принадлежит ИВО семейства функций

$$G_0^k = \left\{ \prod_{i=1}^n W(|y_{i,k}|, \Delta_k, 0, \varepsilon_k) \right\}_{\Delta_k \in [\underline{\Delta}, \bar{\Delta}]},$$

в отсутствие сигнала и ИВО семейства

$$G_1^k = \left\{ \prod_{i=1}^n W(|y_{i,k}|, \Delta_k, q_k, \varepsilon_k) \right\}_{\Delta_k \in [\underline{\Delta}, \bar{\Delta}], q_k \in [q_0, +\infty]}$$

при наличии сигнала.

Плотность распределения случайной помехи $x_{j,k}$ определяется формулой (2) ($j = 1, \dots, m$; $k = 1, \dots, K$).

Задачу обнаружения сигнала сформулируем как задачу проверки гипотезы

$$H_0': W_k(y_{1k}, \dots, y_{nk}) \in G_0^k, \quad k = 1, \dots, K,$$

против альтернативы

$$W_k(y_{1k}, \dots, y_{nk}) \in G_1^k, \quad k = 1, \dots, K.$$

Заметим при этом, что произвольный элемент из G_0^k или G_1^k является плотностью некоторого распределения.

Приведем примеры ПРВ из ИВО семейства функций G_1^k :

$$\sum_{s=1}^m \frac{|y_{sk}|}{|y_{1k}| + \dots + |y_{nk}|} \prod_{i=1}^n W(|y_{i,k}|, \Delta_{ks}, q_{ks}, \varepsilon_k);$$

$$\sum_{s=1}^2 \frac{|\bar{y}_{1k}^s|^2 + \dots + |\bar{y}_{nk}^s|^2}{|y_{1k}|^2 + \dots + |y_{nk}|^2} \prod_{i=1}^n W(|y_{i,k}|, \Delta_{ks}, q_{ks}, \varepsilon_k);$$

$$\bar{y}_{1k}^1 = \mathbf{Re}y_{ik}, \quad \bar{y}_{1k}^2 = \mathbf{Im}y_{sk}.$$

Теорема 2. Решение правило (3) сохраняет свои максиминные свойства и для проверки гипотезы H_0' против альтернативы H_1' .

В доказательстве теорем 1, 2 используется следующая лемма.

Лемма. Функция $\psi(\dots, |y_k|, \dots)$ является монотонно возрастающей по каждому аргументу $|y_k|$, $k = 1, \dots, K$, то есть $\psi(\dots, \alpha |y_k|, \dots) \leq \psi(\dots, \beta |y_k|, \dots)$ при $0 < \alpha \leq \beta$.

При доказательстве леммы используется условие А).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрена и проанализирована задача объединения независимых каналов обнаружения случайного сигнала на фоне негауссовских нестационарных случайных помех при наличии неидеальных обучающих помеховых выборок. Показано, что обнаружение сигнала может быть осуществлено на основе информации $2K$ независимых каналов. В первых, основных, K каналах формируются выборки размером n комплексных амплитуд смеси сигнала и помехи, во вторых, дополнительных, K каналах — только выборочные значения помехи. Приведены примеры для конкретных видов негауссовских помех.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The author declares that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коган И.М. Ближняя радиолокация. Москва: Советское радио, 1973. 272 с.
2. Поляков П.Ф. Прием сигналов в многолучевых каналах. Москва: Радио и связь, 1986. 248 с.
3. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптации информационных систем. Москва: Советское радио, 1977. 432 с.
4. Артюшенко В.М., Воловач В.И., Тяжев А.И. Моделирование непрерывных марковских процессов в дискретном времени на примере радиолокационных сигналов, описываемых стохастическими дифференциальными уравнениями // Радиотехника. 2016. № 12. С. 22–28. EDN: XRLFCB
5. Artyushenko V.M., Volovach V.I., Shakursky M.V. The demodulation signal under the influence of additive and multiplicative non-Gaussian noise. В кн.: Proceedings of 2016 IEEE East-West

- design and test symposium, EWDTs 2016. Yerevan, 2017. ID 7807704. doi: 10.1109/EWDTs.2016.7807704
6. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Comparative analysis of discriminators efficiency of tracking meters under influence of non-Gaussian broadband and band-limited noise. В кн.: 11th International IEEE scientific and technical conference «Dynamics of systems, mechanisms and machines». 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239430
7. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Synthesis and analysis of discriminators under influence of non-Gaussian noise // J Phys: Conf Ser. 2018. Vol. 944. ID 012004. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012004
8. Леман Э. Проверка статистических гипотез. Москва: Наука, 1979. 408 с.
9. Гаек Я., Шидак З. Теория ранговых критериев / под ред. Л.Н. Большева; пер. с англ. Д.М. Чибисова. Москва: Наука, 1971. 375 с.

REFERENCES

1. Kogan IM. *Near-field radar*. Moscow: Soviet Radio; 1973. 272 p. (In Russ.)
2. Polyakov PF. *Signal reception in multipath channels*. Moscow: Radio and Communication; 1986. 248 p. (In Russ.)
3. Repin VG, Tartakovsky GP. *Statistical synthesis under a priori uncertainty and adaptation of information systems*. Moscow: Soviet Radio; 1977. 432 p. (In Russ.)
4. Artyushenko VM, Volovach VI, Tyazhev AI. Simulation of continuous markov processes in discrete-time by the example of radar signals described by stochastic differential equations. *Radioengineering*. 2016;(12):22–28. EDN: XRLFCB
5. Artyushenko VM, Volovach VI, Shakursky MV. The demodulation signal under the influence of additive and multiplicative non-Gaussian noise. In: *Proceedings of 2016 IEEE East-West design and test symposium, EWDTs 2016*. Yerevan, 2017. ID 7807704. doi: 10.1109/EWDTs.2016.7807704

6. Artyushenko VM, Volovach VI. Comparative analysis of discriminators efficiency of tracking meters under influence of non-Gaussian broadband and band-limited noise. In: *11th International IEEE scientific and technical conference «Dynamics of systems, mechanisms and machines»*. 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239430
7. Artyushenko VM, Volovach VI. Synthesis and analysis of discriminators under influence of non-Gaussian noise. *J Phys: Conf Ser*. 2018;944:012004. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012004
8. Lehmann E. *Statistical hypothesis testing*. Moscow: Nauka; 1979. 408 p. (In Russ.)
9. Hajek J, Shidak Z. *Theory of ranking criteria*. Bolshev LN, editor; Chibisov DM, transl. from Engl. Moscow: Nauka; 1971. 375 p. (In Russ.)

ОБ АВТОРЕ

Евгений Кимович Самаров, д-р техн. наук, заведующий кафедрой математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3; eLibrary SPIN: 1077-2126; e-mail: omega511@mail.ru

AUTHOR INFO

Evgeny K. Samarov, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Department of Mathematics, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 1077-2126; e-mail: omega511@mail.ru

УДК 621.396.962:629.7

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_81

Оригинальное исследование

Влияние аддитивных помех и фазовых флуктуаций на характеристики синтезированной апертурной антенны при произвольной траектории движения летательного аппарата

Е.К. Самаров, И.В. Евграфова

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Как правило, в специализированных работах исследуется влияние фазовых флуктуаций принимаемых сигналов в радиолокационных станциях с синтезированной апертурой антенной на разрешение по азимуту и точность определения азимута неподвижных движущихся наземных объектов при произвольных траекториях полета летательного аппарата без учета аддитивных помех.

Цель — определить степень влияния аддитивных помех и фазовых флуктуаций на разрешающую способность и точность определения азимута радиолокационной станции с синтезированной апертурной антенной при произвольной траектории движения летательного аппарата и наземных объектов.

Материалы и методы. Рассмотрено и проанализировано влияние фазовых флуктуаций и аддитивных помех на основные характеристики синтезированной апертурой антенны при произвольной траектории летательных аппаратов и наземных объектов.

Результаты. Получены соотношения для оценки разрешающей способности и точности определения азимута в радиолокационной станции с синтезированной апертурной антенной в условиях воздействия фазовых флуктуаций отраженного сигнала и аддитивных помех при произвольной траектории движения летательного аппарата и наземных объектов.

Выводы. Показано, что в условиях воздействия аддитивных помех математическое ожидание и дисперсия углового положения объекта, а также длительность выходного сигнала по угловому параметру зависят от соотношения энергетических характеристик этого шума и отраженного сигнала.

Ключевые слова: радиолокационная станция; фазовые флуктуации; синтезированная апертура антенны; летательный аппарат; радиолокационное изображение; дисперсия углового положения объекта.

Как цитировать

Самаров Е.К., Евграфова И.В. Влияние аддитивных помех и фазовых флуктуаций на характеристики синтезированной апертурной антенны при произвольной траектории движения летательного аппарата // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 81–87. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_81

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_81

Original study article

How additive interference and phase fluctuations influence the performance of a synthetic aperture antenna on an arbitrary aircraft path

Evgeny K. Samarov, Irina V. Evgrafova

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Dedicated papers often study the influence of phase fluctuations of signals received by radar stations with a synthetic aperture antenna on the azimuth resolution and accuracy of stationary moving ground objects for arbitrary aircraft trajectories without additive interference.

AIM: To determine how additive interference and phase fluctuations influence azimuth resolution and accuracy of a radar station with a synthetic aperture antenna during arbitrary movement of an aircraft and ground objects.

MATERIALS AND METHODS: The article reviews and analyzes the influence of phase fluctuations and additive interference on the key parameters of a synthetic aperture antenna during arbitrary movement of an aircraft and ground objects.

RESULTS: The article presents relationships to assess the resolution and accuracy of azimuth determination by a radar station with a synthetic aperture antenna under the influence of phase fluctuations of the reflected signal and additive interference during arbitrary movement of an aircraft and ground objects.

CONCLUSIONS: It is shown that under the influence of additive interference, the expected value and dispersion of the object's angular position and the output signal duration in the angular position depend on the ratio of the output performance of this noise and the reflected signal.

Keywords: radar station; phase fluctuations; synthetic aperture antenna; aircraft; radar image; angular position dispersion of an object.

To cite this article

Samarov EK, Evgrafova IV. How additive interference and phase fluctuations influence the performance of a synthetic aperture antenna on an arbitrary aircraft path. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):81–87. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_81

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–5] исследовано влияние фазовых флуктуаций (ФФ) принимаемых сигналов в радиолокационных станциях (РЛС) с синтезированной апертурной антенной (САА) на разрешение по азимуту и точность определения азимута неподвижных движущихся [1, 2] наземных объектов (целей) при произвольных траекториях полета летательного аппарата (ЛА) и угле β_n [3] без учета аддитивных помех.

Рассмотрим и проанализируем влияние фазовых флуктуаций и аддитивных помех на указанные основные характеристики САА при произвольной траектории ЛА и наземных объектов.

Оценка влияния фазовых флуктуаций и аддитивных помех на основные характеристики синтезированной апертурной антенны при произвольной траектории полета летательного аппарата и наземных объектов

Оценку будем осуществлять с помощью метода моментов по модулю функции выходного сигнала, радиолокационного изображения (РЛИ), системы обработки.

Сигнал на выходе системы обработки САА, отраженный от i -го движущегося объекта Π_i [3]:

$$S_n(\beta_i, \tau) = A(\beta_i, \tau) \exp\{-i[kD(\beta_i, \tau) - \beta_c(\tau)]\} + \dot{n}(\tau), \quad (1)$$

где $A(\beta_i, \tau)$ — амплитуда сигнала; β_i — угол наблюдения i -го движущегося объекта относительно оси O_1Y_1 системы координат синтезирования $O_1X_1Y_1Z_1$; τ — текущее время на пространственном интервале синтезирования (ИС) L_c , которому соответствует временной ИС T_c ($|\tau| \leq T_c/2$); $k = 4\pi/\lambda$ — удвоенное волновое число; λ — длина волны САА; $D(\beta_i, \tau)$ — расстояние между фазовым центром антенны (ФЦА) и i -м объектом на ИС; $\beta_c(\tau)$ — флуктуации фазы, обусловленные различными физическими процессами [6]; $\dot{n}(\tau)$ — аддитивная комплексная помеха с нулевым математическим ожиданием и практически постоянным значением спектральной плотности в полосе пропускания приемника САА, с временем корреляции, значительно меньшим T_c .

На рис. 1 изображены две правые ортогональные системы координат: нормальная земная система координат (НЗСК) $O_0X_gY_gZ_g$ и подвижная система координат синтезирования (СКС) $O_1X_1Y_1Z_1$, ось O_1Z_1 которой проходит по местной вертикали через ФЦА в момент времени t полета, совпадающий с центром каждого временного ИС ($\tau = 0$).

Ось O_1Y_1 проходит в тот же момент времени через опорную точку Π_0 , расположенную под углом β_n относительно вектора v_n путевой скорости ЛА. Углы ψ_k и γ_k — соответственно углы карты и падения; v_k — вектор земной (полной) скорости ФЦА (ЛА); β — текущее значение азимутального угла относительно оси O_1Y_1 в

пределах углового размера β_k кадра РЛИ (для упрощения записи аргумент t в последующих соотношениях опущен); 1 и 2 — траектория и линии пути ФЦА (ЛА), 3 и 4 — кадр РЛИ и полосы равных дальностей.

При обработке в РСА сигнала (1) методом гармонического анализа сигнал на выходе линейной части системы обработки [2]:

$$\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega) = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} A(\beta_i, \tau) \dot{H}(\alpha_0, \omega_0, \omega) \exp\{-i\omega\tau\} d\tau + \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{n}(\tau) \dot{H}(\tau) \exp\{ikD(\tau)\} \exp\{-i\omega\tau\} d\tau, \quad (2)$$

где ω — круговая частота; $H(\tau)$ — весовая функция, обычно являющаяся четной функцией [1]; $D(\tau) = D(0, \tau)$ — текущее расстояние «ФЦА- Π_0 » на ИС;

$$\omega_0 = k[v_{Ri} + \beta_i(v_{iX_1} - v_{X_1})\sin\gamma + \beta_i^2(v_{iY_1} - v_{Y_1})\sin\gamma/2]; \quad (3)$$

$$\alpha_0 = k\{a_{Ri} + a_{RK} + \beta_i[(a_{iX_1} - a_{X_1})\sin\gamma - a_{RK1}] + \beta_i^2[(a_{iY_1} - a_{Y_1})\sin\gamma - a_{RK2}]/2\}; \quad (4)$$

$$\dot{H}(\alpha_0, \omega_0, \omega) = H(\tau) \exp\{i[\alpha_0\tau^2 + \omega_0\tau + \beta_c(\tau)]\}, \quad (5)$$

где v_{Ri} и a_{Ri} — радиальные скорость и ускорение движущегося объекта, цели, Π_i относительно ФЦА при $\tau = 0$; v_{X_1} , v_{iX_1} и v_{Y_1} , v_{iY_1} — составляющие скоростей ФЦА и Π_i по осям O_1X_1 и O_1Y_1 СКС в тот же момент времени; a_{X_1} , a_{iX_1} и a_{Y_1} , a_{iY_1} — составляющие ускорения ФЦА и Π_i по осям O_1X_1 и O_1Y_1 СКС при $\tau = 0$.

Приведенные скорости и ускорения, а также значения a_{RK} , a_{RK1} , a_{RK2} определены в [2], где показано, что при линейной связи между текущими значениями

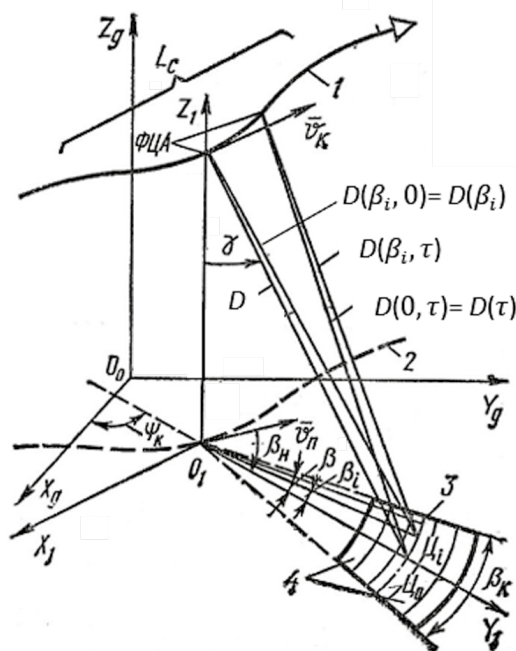


Рис. 1. Геометрическое пояснение двух правых ортогональных систем координат.

Fig. 1. Geometric interpretation of two right-handed orthogonal coordinate systems.

$$\text{угла } \beta \text{ и круговой частотой } \omega \left\{ \beta \approx \frac{\omega}{\left[k(v_{\text{LX}_1} - v_{X_1}) \sin \gamma \right]} \right\},$$

математическое ожидание, дисперсия положения центра тяжести модуля выходного сигнала, характеризующие точность определения азимута объекта на РЛИ, и разрешение по азимутальному углу задаются равенствами:

$$m_\beta = \frac{m_\omega}{\left[k(v_{\text{LX}_1} - v_{X_1}) \sin \gamma \right]};$$

$$D_{m_\beta} = \frac{D_m}{\left[k(v_{\text{LX}_1} - v_{X_1}) \sin \gamma \right]^2}; \quad (6)$$

$$\delta\beta_A = 2|R_\beta| = 2 \left| \frac{R_\omega}{\left[k(v_{\text{LX}_1} - v_{X_1}) \sin \gamma \right]} \right|,$$

где R_β — радиус протяженности модуля выходного сигнала;

$$m_\omega = M\{m\} = M \left\{ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega |\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega)|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega)|^2 d\omega} \right\},$$

$$D_m = M\{m^2\} - m_\omega^2, \quad (7)$$

$$R_\omega = \sqrt{M \left\{ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega)|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega)|^2 d\omega} \right\} - M\{m^2\}}. \quad (8)$$

Здесь $M\{\cdot\}$ — операция статистического усреднения.

С помощью (2)–(8), используя теорию комплексных случайных процессов [7] и методику из [1], после преобразований можно получить соотношения для m_β , D_{m_β}

$$D_{m_\beta} = \left(\frac{U}{q_S} \right)^2 \left\{ \frac{1}{T_c^2} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} K_{\beta_c}(\tau_1, \tau_2) H^2(\tau_1) H^2(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 - \left[\frac{1}{T_c} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^2(\tau) d\tau \right]^2 + \right.$$

$$+ \frac{2}{q_{A_n} T_c} \left[3 \int_{-T_c/2}^{T_c/2} [H'(\tau)]^2 H^2(\tau) d\tau + (\omega_0 - \omega_*)^2 + \omega_0 \omega_* \right] \times$$

$$\times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} H^4(\tau) d\tau + (2\omega_0 - \omega_*) \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^4(\tau) d\tau + (4\alpha_0 - ka_R) \times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} \tau H^4(\tau) d\tau +$$

$$\left. + \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^4(\tau) d\tau \right\} + \frac{1}{q_{A_n}^2} [4H''(\tau)|_{\tau=0} + \omega_0^2]; \quad (10)$$

$$R_\beta^2 = \frac{U^2(1+1/q)}{2\pi T_c q_S} \left\{ \left(1 + \frac{1}{q_{A_n}} \right) \int_{-T_c/2}^{T_c/2} [H'(\tau)]^2 d\tau + \left(4\alpha_0^2 + \frac{k^2 a_R^2}{q_{A_n}} \right) \times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \tau^2 H^2(\tau) d\tau + \frac{D_{n'}}{D_n q_{A_n}} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} H^2(\tau) d\tau + \right.$$

$$+ T_c q_S \left[\left(\omega_0^2 + \frac{\omega_*^2}{q} \right) - \frac{2\pi}{1+1/q} \left(\omega_0 + \frac{\omega_*}{q} \right)^2 \right] + 4\alpha_0 \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} \tau H^2(\tau) d\tau + 2 \left[\omega_0 - \frac{2\pi}{1+1/q} \left(\omega_0 + \frac{\omega_*}{q} \right) \right] \times$$

$$\times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^2(\tau) d\tau + \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\left\{ [\beta_c(\tau)]^{-2} \right\} H^2(\tau) d\tau - \frac{2\pi}{T_c q_S (1+1/q)} \times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^2(\tau) d\tau \left. \right\} - D_{m_\beta}. \quad (11)$$

и $R_{\beta'}$, в подынтегральные выражения которых входят дисперсия

$$D_n = M\left\{ |\dot{n}(\tau)|^2 \right\},$$

и корреляционная функция

$$R_n(\tau_1 - \tau_2) = M\left\{ \dot{n}(\tau_1) n^*(\tau_2) \right\},$$

аддитивной комплексной помехи, а также дисперсия

$$D_{n'} = M\left\{ |\dot{n}'(\tau)|^2 \right\},$$

корреляционная функция

$$R_{n'}(\tau_1 - \tau_2) = M\left\{ \dot{n}'(\tau_1) n'^*(\tau_2) \right\} = \frac{\partial^2}{\partial \tau_1 \partial \tau_2} R_n(\tau_1 - \tau_2),$$

производной этой помехи.

Так как по условию время корреляции аддитивной помехи значительно меньше T_c , а спектральная плотность $S_m(\omega)$ этой помехи практически не изменяется в полосе пропускания приемника САА ($S_m(\omega) \approx N_n$), с определен-

ной степенью приближения можно получить [7]:

$$R_n(\tau_2 - \tau_1) \approx N_n \delta(\tau_2 - \tau_1);$$

$$R_{n'}(\tau_1 - \tau_2) \approx N_n \frac{\partial^2}{\partial \tau_1 \partial \tau_2} \delta(\tau_2 - \tau_1),$$

где $\delta(\tau_2 - \tau_1)$ — дельта-функция Дирака.

Воспользовавшись теорией обобщенных функций [8–10], в частности фильтрующими свойствами дельта-функции и ее производных, соотношения для m_β , D_{m_β} и R_β можно упростить:

$$m_\beta = U \left[\omega_0 + \frac{\omega_*}{q} + \frac{1}{T_c q_S} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^2(\tau) d\tau \right]; \quad (9)$$

В выражениях (9)–(11) переменные имеют следующие значения:

$K_{\beta_c}(\tau_1, \tau_2) = M\{\beta_c'(\tau_1)\beta_c'(\tau_2)\}$ — ковариационная функция производной случайного процесса $\beta_c(\tau)$;

$\omega_* = kU_R$;

$$U = \frac{2\pi}{\left(1 + \frac{1}{q}\right) \left[k(v_{LX_1} - v_{X_1}) \sin\gamma \right]}$$

v_R и a_R — радиальная скорость и ускорение ФЦА относительно опорной точки L_0 [3];

$q = E_{SH} / E_{nH}$;

$q_S = E_{SH} / [A^2(\beta_i)T_c]$;

$q_{A_n} = \frac{A^2(\beta_i)T_c}{D_n T_c} = \frac{A^2(\beta_i)T_c}{N_n}$;

$E_{SH} = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} A^2(\beta_i, \tau) H^2(\tau) d\tau \approx A^2(\beta_i) \int_{-T_c/2}^{T_c/2} H^2(\tau) d\tau$ —

энергия «взвешенного» сигнала;

$E_{nH} = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} D_n H^2(\tau) d\tau = D_n \int_{-T_c/2}^{T_c/2} H^2(\tau) d\tau$ — энер-

гия «взвешенной» помехи (шума) $n^*(\tau)$.

Если $n^*(\tau)$ — эргодический процесс с временем корреляции значительно меньше T_c , а $H(\tau)$ при $|\tau| = \frac{T_c}{2}$ равна или близка к нулю, то

$\int_{-T_c/2}^{T_c/2} n^2(\tau) H^2(\tau) d\tau \approx T_c \lim_{T_c \rightarrow \infty} \frac{1}{T_c} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} n^2(\tau) H^2(\tau) d\tau = E_{nH}$.

В случае стационарности процесса $\beta_c(\tau)$

$M\{\beta_c'(\tau)\} = 0, M\{[\beta_c'(\tau)]^2\} = D_{\beta_c}$,

$K_{\beta_c}(\tau_1, \tau_2) = R_{\beta_c}(\tau_2 - \tau_1)$,

(D_{β_c} — дисперсия производной стационарного фазового шума; $R_{\beta_c}(\tau_2 - \tau_1)$ — его корреляционная функция), и (9)–(11) значительно упрощаются.

С помощью (9)–(11) можно оценивать раздельное и одновременное влияние ФФ и аддитивной помехи (шума) на основные характеристики САА при обработке сигналов как способом гармонического анализа, так и способом «прямой» свертки, если в них $\beta_i = 0$.

В [8–11] проведен качественный анализ влияния нестационарного и стационарного фазового шума на разрешающую способность САА и точность определения азимута наземных объектов, характеризуемую значениями m_β и D_{m_β} при различных способах обработки сигналов.

На рис. 2 представлены графики зависимости $\frac{m_\omega}{2\pi} = f\left(\frac{1}{\sqrt{q}}\right)$, на рис. 3 — $\frac{D_m}{4\pi^2} = f\left(\frac{1}{\sqrt{q}}\right)$, на рис. 4 — $R_\omega = f\left(\frac{1}{\sqrt{q}}\right)$, рассчитанные при фазовых флюктуациях, которые связаны с m_β , D_{m_β} и $\delta\beta_A$ линейными соотношениями (6).

Некоторый сдвиг значений $\frac{m_\omega}{2\pi}$ вверх при $\frac{1}{\sqrt{q}} = 0$ обусловлен смещением цели L_i относительно центра кадра РЛИ.

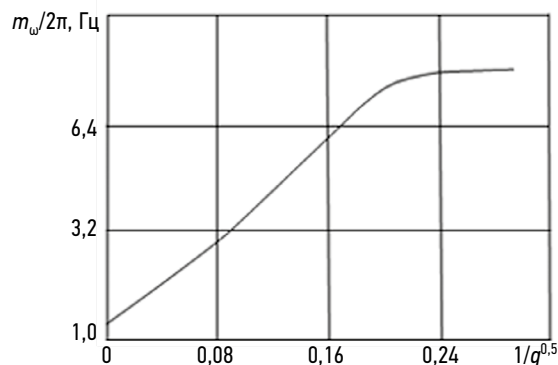


Рис. 2. Зависимость $m_\omega/2\pi$ от величины $f(1/q^{0.5})$.
Fig. 2. Dependence of $m_\omega/2\pi$ on $f(1/q^{0.5})$.

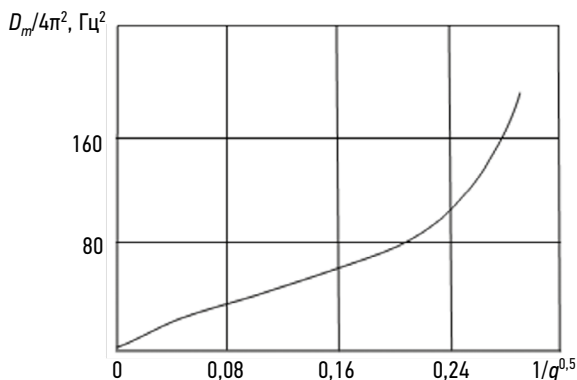


Рис. 3. Зависимость $D_m/4\pi^2$ от величины $f(1/q^{0.5})$.
Fig. 3. Dependence of $D_m/4\pi^2$ on $f(1/q^{0.5})$.

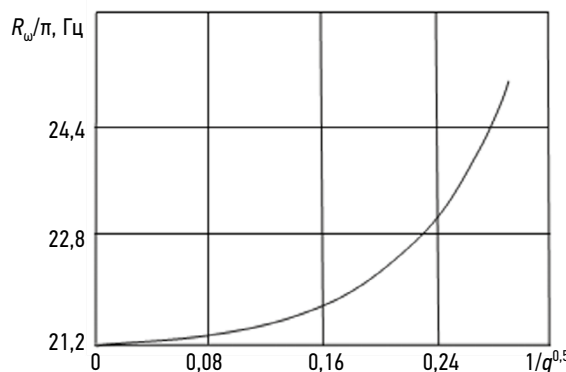


Рис. 4. Зависимость R_ω от величины $f(1/q^{0.5})$.
Fig. 4. Dependence of R_ω on $f(1/q^{0.5})$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрено и проанализировано влияние фазовых флуктуаций и аддитивной помехи (шума) на характеристики синтезированной апертурной антенны. Получены соотношения для оценки разрешающей способности и точности определения азимута в радиолокационной станции с синтезированной апертурной антенной в условиях воздействия фазовых флуктуаций отраженного сигнала и аддитивных помех при произвольной траектории движения летательного аппарата и наземных объектов. Показано, что в условиях воздействия аддитивных помех (шума) математическое ожидание и дисперсия углового положения объекта, а также длительность выходного сигнала по угловому параметру зависят от соотношения энергетических характеристик этого шума и отраженного сигнала.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Личный вклад каждого автора: Е.К. Самаров — разработка концепции, проведение исследования, подготовка статьи и одобрение финальной версии перед публикацией; И.В. Евграфова — участие в проведении исследования и подготовке статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: E.K. Samarov, conceptualising, researching and drafting the article and approving the final version before publication; I.V. Evgrafova, participation in the research and preparation of the article.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богачев А.С., Толстов Е.Ф. Применение радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенной. Москва: ВИНТИ, 1986. 145 с.
2. Ванштейн Л.А., Вакман Д.Е. Разделение частот в теории колебаний и волн. Москва: Наука, 1983. 287 с.
3. Евсиков Ю.А., Чапурский В.В. Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах. Москва: Высшая школа, 1977. 264 с.
4. Функциональный анализ / под ред. С.Г. Крейна. Москва: Наука, 1972.
5. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н., и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием Р 15 апертуры антенны / под ред. В.Т. Горяинова. Москва: Радио и связь, 1988. 304 с.
6. Сазонов Н.А., Очеловский А.В., Романенко Г.В., и др. Влияние фазовых флуктуаций и аддитивного шума на характеристики РСА // Радиотехника. 1988. № 10. С. 43–47.
7. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Comparative analysis of discriminators efficiency of tracking meters under influence of non-Gaussian broadband and band-limited noise. В кн.: 11th international IEEE scientific and technical conference «Dynamics of systems, mechanisms and machines». 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239430
8. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Synthesis and analysis of discriminators under influence of non-Gaussian noise // J Phys: Conf Ser. 2018. Vol. 944. ID 012004. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012004
9. Artyushenko V.M., Volovach V.I., Shakursky M.V. The demodulation signal under the influence of additive and multiplicative non-Gaussian noise. В кн.: Proceedings of 2016 IEEE East-west design and test symposium, EWDTs 2016. Yerevan, 2017. ID 7807704. doi: 10.1109/EWDTs.2016.7807704
10. Blacknell D., Freeman A., Quegan S., et al Geometric accuracy in airborne SAR images // IEEE Trans Aerosp Electron Syst. 1989. Vol. 25, N 2. P. 241–258. doi: 10.1109/7.18685
11. Buckreuss S. Motion errors in an airborne synthetic aperture radar system // Eur Trans Telecommun. 1991. Vol. 2, N 6. P. 655–664. doi: 10.1002/ett.4460020609

REFERENCES

1. Bogachev AS, Tolstov EF. *Application of radar systems with synthesized aperture antenna*. Moscow: VINITI; 1986. 145 p. (In Russ.)
2. Vanstein LA, Wackman DE. *Frequency separation in the theory of vibrations and waves*. Moscow: Nauka; 1983. 287 p. (In Russ.)
3. Evsikov YuA, Chapursky VV. *Transformation of random processes in radio engineering devices*. Moscow: High School; 1977. 264 p. (In Russ.)
4. Crane SG, editor. *Functional analysis*. Moscow: Nauka; 1972. (In Russ.)
5. Antipov VN, Goryainov VT, Kulin AN, et al. *Radar stations with digital synthesis of P 15 antenna aperture*. Goryainov VT, editor. Moscow: Radio and Communication; 1988. 304 p. (In Russ.)
6. Sazonov NA, Ochevovskiy AV, Romanenko GV, et al. *Influence of phase fluctuations and additive noise on PCA characteristics*. *Radioengineering*. 1988;(10):43–47. (In Russ.)
7. Artyushenko VM, Volovach VI. Comparative analysis of discriminators efficiency of tracking meters under influence of non-Gaussian broadband and band-limited noise. In: *11th international IEEE scientific and technical conference «Dynamics of systems, mechanisms and machines»*. 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239430
8. Artyushenko VM, Volovach VI. Synthesis and analysis of discriminators under influence of non-Gaussian noise. *J Phys: Conf Ser*. 2018;944:012004. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012004
9. Artyushenko VM, Volovach VI, Shakursky MV. The demodulation signal under the influence of additive and multiplicative non-Gaussian noise. In: *Proceedings of 2016 IEEE East-west design and test symposium, EWDTs 2016*. Yerevan, 2017. ID 7807704. doi: 10.1109/EWDTs.2016.7807704
10. Blacknell D, Freeman A, Quegan S, et al Geometric accuracy in airborne SAR images. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*. 1989;25(2):241–258. doi: 10.1109/7.18685
11. Buckreuss S. Motion errors in an airborne synthetic aperture radar system. *Eur Trans Telecommun*. 1991;2(6):655–664. doi: 10.1002/ett.4460020609

ОБ АВТОРАХ

***Евгений Кимович Самаров**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; eLibrary SPIN: 1077-2126; e-mail: omega511@mail.ru

Ирина Владимировна Евграфова, канд. пед. наук; декан факультета естественнонаучного и гуманитарного образования ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; e-mail: spbmtu@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Evgeny K. Samarov**, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Department of Mathematics, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 1077-2126; e-mail: omega511@mail.ru

Irina V. Evgrafova, Cand. Sci. (Pedagogy); Dean of the Faculty of Natural Sciences and Humanities, St. Petersburg State Marine Technical University; e-mail: spbmtu@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 681.518.5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_89

Оригинальное исследование

Применимость САМ-систем в области аддитивных технологий на примере работы с электродуговым выращиванием и СПРУТКАМ

И.Д. Бородкин, З.И. Гимранов, М.А. Олейник, В.Г. Смелов

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В России активно развиваются технологии электродугового выращивания и прямого лазерное выращивание, находящие применение в различных отраслях. Электродуговое выращивание привлекает внимание благодаря своей экономичности и использованию стандартной роботизированной сварочной ячейки.

Цель — исследование возможности применения САМ-системы СПРУТКАМ (САМ — Computer Aided Manufacturing) для автоматизации процесса генерации управляющих программ для электродугового выращивания металлических изделий.

Материалы и методы. На примере изготовления реплики средневекового топорща продемонстрированы этапы подготовки 3D-модели, создания цифрового двойника оборудования, построения траектории движения инструмента и генерации управляющей программы.

Результаты. Полученная из СПРУТКАМ управляющая программа была загружена в контроллер робота-манипулятора и выполнена без ошибок. В результате выполнения управляющей программы была выращена заготовка топорща. Проанализированы результаты эксперимента, выявлены основные проблемы и предложены пути их решения.

Выводы. Исследование показало, что СПРУТКАМ может быть успешно использован для автоматизации процесса выращивания получаемых изделий, однако требует дополнительной настройки и оптимизации параметров.

Ключевые слова: аддитивные технологии; программное обеспечение; САМ-система; СПРУТКАМ; электродуговое выращивание.

Как цитировать

Бородкин И.Д., Гимранов З.И., Олейник М.А., Смелов В.Г. Применимость САМ-систем в области аддитивных технологий на примере работы с электродуговым выращиванием и СПРУТКАМ // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 89–96. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_89

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_89

Original study article

CAM system applications in additive technologies as shown by wire and arc additive manufacturing and SPRUTCAM

Ilya D. Borodkin, Zafar I. Gimranov, Maksim A. Oleinik, Vitaliy G. Smelov

Samara National Research University, Samara, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: In Russia, wire and arc additive manufacturing and laser direct deposition technologies are actively developing and applied in various industries. Wire and arc additive manufacturing is gaining interest as a cost-effective technology that uses a standard robotic welding cell.

AIM: To study a possible application of SPRUTCAM CAM (Computer Aided Manufacturing) system to automate the control program generation for wire and arc additive manufacturing of metal products.

MATERIALS AND METHODS: The article illustrates the stages of 3D modeling, creating a digital equipment twin, building the tool's movement path and generating a control program by making a copy of a medieval axe handle.

RESULTS: A SPRUTCAM control program was uploaded to the robotic arm controller and executed without errors. The control program allowed to make a blank axe handle. The article reviews the experiment, identifies key issues, and proposes ways to solve them.

CONCLUSIONS: The study showed that SPRUTCAM can successfully be used to automate the wire and arc additive manufacturing; however, it requires additional adjustment and optimization of parameters.

Keywords: additive technologies; software; CAM system; SPRUTCAM; wire and arc additive manufacturing.

To cite this article

Borodkin ID, Gimranov ZI, Oleinik MA, Smelov VG. CAM system applications in additive technologies as shown by wire and arc additive manufacturing and SPRUTCAM. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):89–96. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_89

Received: 04.02.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время DED (Direct Energy Deposition) технологии, такие как электродуговое выращивание (ЭДВ), прямое лазерное выращивание (ПЛВ), активно развиваются в России и находят применение все в большем количестве различных отраслей — от аэрокосмической до судостроительной [1]. Эти технологии привлекают внимание благодаря своей высокой производительности, экономичности и возможности работы с широким спектром материалов.

Технология электродугового выращивания является относительно недорогой и доступной по сравнению с другими методами аддитивного производства металлических заготовок, поскольку для ее реализации необходима стандартная роботизированная сварочная ячейка, которая уже широко применяется во многих отраслях производства. Главным отличием является подход к написанию управляющих программ для роботизированных ячеек аддитивного производства. В случае выращивания изделий сложной формы процесс ручного программирования робота-манипулятора становится крайне трудозатратным и продолжительным из-за большого количества точек, которые робот должен пройти в процессе выращивания. Для автоматизации процесса подготовки управляющей программы выращивания можно использовать САМ-системы (Computer Aided Manufacturing), которые позволяют строить траектории рабочего инструмента по импортированной 3D-модели изделия и выбранной стратегии обработки. Поскольку изначально САМ-системы создавались для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и субтрактивных технологий, набор параметров для построения траектории движения инструмента не всегда является подходящим в случае работы с аддитивными технологиями, что не позволяет раскрыть преимущества аддитивных технологий в полной мере. Из-за этого многие производители оборудования прибегают к разработке собственного программного обеспечения (ПО) с определенным набором параметров, которыми удобно оперировать для управления процессом выращивания изделия. Проблема такого подхода заключается в отсутствии унификации данного ПО для различного оборудования. Зачастую ПО, разрабатываемое для определенного станка, может работать только с ним. Унификация ПО является важным шагом на пути к распространению печати металлом с помощью DED-технологий [2]. Важность такого подхода можно заметить на примере уже широко распространенной технологии Fused Deposition Modeling (FDM) — печати

пластиком, где принтеры разных производителей могут программироваться с помощью одной программы. САМ-системы во многом подготовлены для работы с различным оборудованием, а в случае отсутствия нужного оборудования обладают удобным инструментарием для его добавления в систему¹.

Компании и исследовательские центры активно разрабатывают ПО для работы с технологией ЭДВ. Компания xWeld является производителем оборудования аддитивного производства по технологии ЭДВ, предлагая как портальные, так и роботизированные установки. Для генерации управляющих программ используются PowerMill, СПРУТКАМ, Simplify3D, а также слайсер собственной разработки с возможностью непланарного слайсинга, что позволяет производить наплавку на поверхности сложной формы². Подразделение компании S7 Space, занимающееся технологией ЭДВ, разрабатывает внутреннее ПО с функцией обратной связи для минимизации геометрических отклонений, интегрируя его с оборудованием аддитивного производства и САД-системами³.

Лаборатория легких материалов и конструкций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого имеет обширный опыт работы с алюминиевыми, титановыми и никелевыми сплавами. Лаборатория также занимается опытным производством принтеров «ПРИЗМА». Однако ПО, которое они применяют для работы с ЭДВ, является закрытым и информации в открытых источниках о его особенностях нет.

Перечисленные выше примеры подчеркивают разнообразие используемого ПО для генерации управляющих программ среди различных технологических центров, что говорит об актуальности данной проблемы.

Цель работы — исследование возможности применения САМ-системы СПРУТКАМ версии 17 для автоматизации процесса генерации управляющих программ выращивания заготовок по технологии ЭДВ на примере изготовления реплики средневекового топорща.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Исследование производилось на оборудовании аддитивного производства по технологии ЭДВ, включая шестиосевой робот-манипулятор Kawasaki BA-006L, сварочный источник ALLOY MC-501MXi, сварочную горелку Abicor Binzel и двухосевой позиционер RBW 2-250.

Сварочный робот-манипулятор BA-006L обладает пустотелыми звеньями и специальными площадками для удобного монтажа сварочного оборудования.

¹ Ye R. What is computer-aided manufacturing: definition, types, applications & advantages. URL: <https://www.3erp.com/blog/computer-aided-manufacturing> (дата обращения: 05.09.2024).

² xweld.ru [Электронный ресурс]. xWeld. URL: <https://xweld.ru/about> (дата обращения: 05.09.2024).

³ ritm-magazine.com [Электронный ресурс]. S7 space: проволоочно-дуговая аддитивная технология в современном производстве. URL: <https://ritm-magazine.com/ru/video/s7-space-provolочно-dugovaya-additivnaya-tehnologiya-v-sovremennom-proizvodstve.html> (дата обращения: 05.09.2024).

Таблица 1. Основные характеристики робота-манипулятора Kawasaki BA-006L**Table 1.** Key specifications of Kawasaki BA-006L robotic manipulator

Характеристики	Значение
Количество степеней свободы, шт	6
Полезная нагрузка, кг	6
Повторяемость, мм	±0,08
Предельная досягаемость, мм	2036
Масса, кг	160

Таблица 2. Основные характеристики сварочного источника ALLOY MC-501MXi**Table 2.** Key specifications of ALLOY MC-501MXi welder

Характеристики	Значение
Диапазон регулировки сварочного тока, А	20–500
Диапазон регулировки сварочного напряжения, В	14–50
Специальные режимы	MIG/Pulse/Double Pulse/MAG/MMA
Диаметр сварочной проволоки, мм	0,8, 1,0, 1,2, 1,6
Масса, кг	55

Таблица 3. Химический состав проволоки 12X18H10T согласно ГОСТ 5632-2014**Table 3.** Chemical composition of 12X18H10T wire (GOST 5632-2014)

Химический элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P	Fe
Массовая доля, %	Не более 0,12	Не более 0,80	Не более 2,00	17,00–19,00	9,00–11,00	5 С–0,80	Не более 0,020	Не более 0,040	Основа

Основные характеристики робота-манипулятора представлены в табл. 1.

Сварочный источник MC-501MXi работает в режимах MIG и PMIG сварки, что делает его пригодным для работы с большинством доступных сварочных материалов. Основные характеристики сварочного источника представлены в табл. 2.

Двухосевой позиционер RBW 2-250 облегчает процесс выращивания изделий сложной формы благодаря

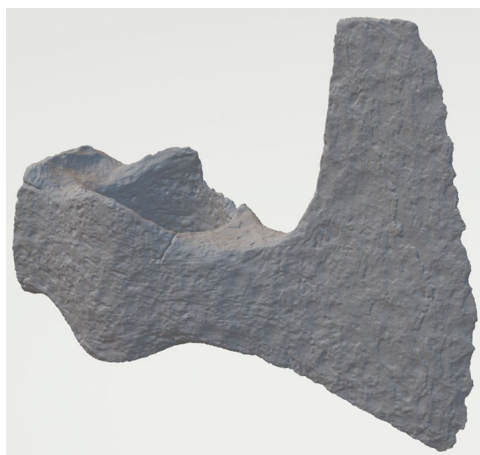


Рис. 1. Отсканированная модель средневекового топорика.
Fig. 1. Scanned model of a medieval axe handle.

возможности поворота заготовки в двух плоскостях с необходимой скоростью для качественной наплавки. Грузоподъемность позволяет изготавливать крупногабаритные заготовки массой до 250 кг. Управление позиционером осуществляется через контроллер робота, что позволяет синхронизировать их движение и обеспечить необходимую точность и производительность.

В качестве исходного материала для выращивания использовалась проволока диаметром 1,2 мм марки 12X18H10T, химический состав которой приведен в табл. 3 согласно ГОСТ 5632-2014⁴. Данный материал широко используется в области аддитивных технологий, хорошо изучен и обладает отличной свариваемостью, что обеспечивает стабильность процесса наплавки и высокое качество получаемых изделий. Для защиты сварочной ванны от воздействия кислорода использовался чистый аргон.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве предмета исследования была выбрана реплика средневекового топорика. Оригинальное топориче было найдено на территории Самарской области

⁴ ГОСТ 5632-2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные: дата введения 2015-01-01. Москва: Стандартинформ, 2015. 16 с.

и отсканировано. 3D-модель скана топорича представлена на рис. 1.

Поскольку оригинальное топориче сильно деформировано и по отсканированной модели было невозможно подготовить технологическую модель для дальнейшего выращивания, была разработана собственная 3D-модель изделия в САД-системе Компас-3D. Затем по разработанной 3D-модели была создана технологическая модель изделия, подготовленная с учетом ограничений и особенностей технологии ЭДВ. Острая кромка лезвия была затуплена, поскольку острые углы в изделии будут создавать точки накопления материала в процессе выращивания. Верхняя часть топорича была выровнена, поскольку она будет прилегать к плоской подложке. Также был добавлен припуск в 3 мм по всей поверхности детали под дальнейшую механическую обработку. Конечный вид технологической модели представлен на рис. 2.

Для достижения цели исследования подготовка СПРУТКАМ к работе с установкой по ЭДВ была разбита на несколько этапов.

В рамках первого этапа был создан цифровой двойник ячейки ЭДВ с помощью утилиты «MachineMaker», встроенной в САМ-систему СПРУТКАМ⁵. Цифровой двойник позволил предугадывать кинематические ограничения оборудования и возможные столкновения на этапе симуляции процесса наплавки. Были импортированы 3D-модели следующего оборудования и оснастки:

- робот-манипулятор Kawasaki BA-006L;
- двухосевой позиционер RBW 2-250;
- сварочный стол;
- постамент робота.

Импортированные компоненты были настроены: для позиционера и робота-манипулятора были заданы базовые точки, рабочие зоны, а также ограничения на углы отклонения осей и их угловые скорости. Эти параметры критически важны для предотвращения коллизий и обеспечения безопасности работы оборудования. Конечный вид цифрового двойника представлен на рис. 3.

На втором этапе необходимо было построить траекторию движения инструмента, по которой происходит

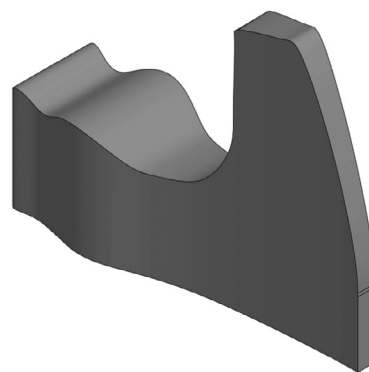


Рис. 2. Подготовленная технологическая модель для выращивания.

Fig. 2. Prepared engineering model for wire and arc additive manufacturing.

наплавка. В систему СПРУТКАМ импортировали подготовленную ранее 3D-модель изделия в формате *.stp. Далее была определена стратегия и технологические параметры процесса выращивания.

Заполнение внутреннего объема изделия проходило параллельными валиками, расположенными вдоль оси симметрии топорича. Величина перекрытия параллельных проходов составляла 60 % от ширины одиночного валика. Между слоями осуществлялся разворот направления наплавки на 180°, таким образом компенсировали неравномерность высоты в начале и конце наплавляемого валика, после заполнения наплавляется один валик, образующий контур заготовки. Для предотвращения столкновений инструмента с заготовкой были заданы подходы и отходы при переходе между наплавляемыми валиками. Остальные параметры заданы в соответствии с режимом сплавления для проволоки 12X18H10T. Параметры режима сплавления указаны в табл. 4.

После выбора стратегии и определения всех необходимых параметров был произведен расчет траектории движения инструмента. Импортированная модель была разделена на слои согласно выставленной высоте валика, после чего были рассчитаны траектории заполнения

Таблица 4. Параметры режима сплавления проволоки из стали 12X18H10T

Table 4. Fusion parameters of 12X18H10T steel wire

Параметры режима	Значение
Сварочный ток, А	220
Сварочное напряжение, В	18
Скорость наплавки, м/с	12
Подача проволоки, м/мин	4,5
Подача защитного газа, л/мин	14
Высота валика, мм	3
Ширина валика, мм	5

⁵ kb.sprutcaml.com [Электронный ресурс]. Introduction to SprutCAM X. URL: <https://kb.sprutcaml.com/docs/SprutCAM/17/en/4.html> (дата обращения: 05.09.2024).

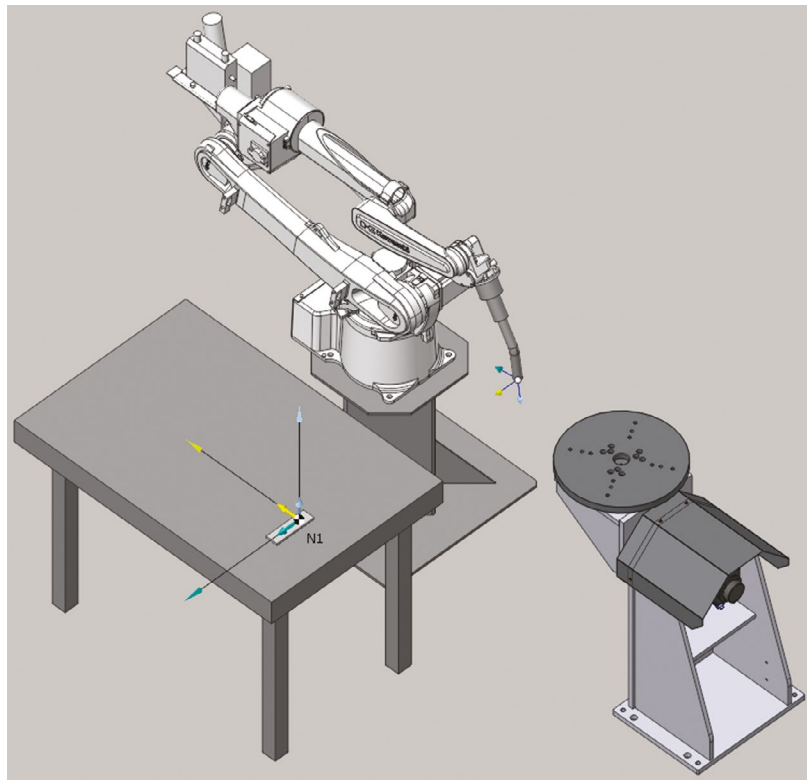


Рис. 3. Созданный цифровой двойник роботизированной ячейки в утилите MachineMaker.
Fig. 3. Digital twin of a robotic cell created in MachineMaker.

каждого слоя в соответствии с выбранными параметрами и стратегией. Пример заполнения одного слоя представлен на рис. 4.

После генерации траекторий было произведено моделирование процесса выращивания топорища вместе с визуализацией процесса наплавки. При моделировании

процесса выявилось, что в нескольких местах траектории шестая ось робота выходила за пределы допустимых углов отклонения, что привело бы к остановке процесса наплавки во время выращивания. Для решения этой проблемы была перестроена карта осей робота-манипулятора в автоматическом режиме. В результате после

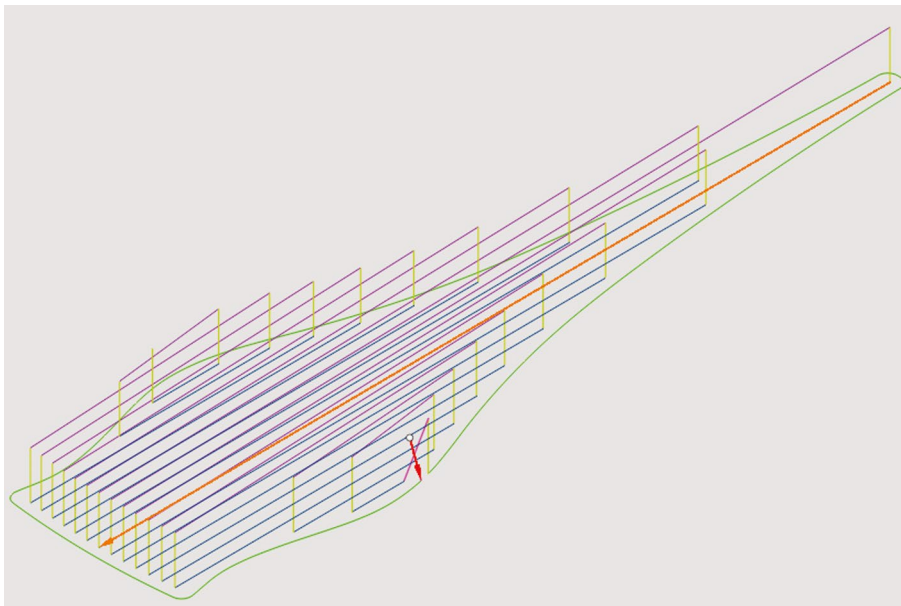


Рис. 4. Пример заполнения одного слоя. Зеленый цвет линий — контур изделия, синий — заполнение внутри контура, фиолетовый — переходы между валиками, желтый — подходы и отходы.
Fig. 4. Making of a layer. Green lines show the product outline; blue lines show the filling inside the outline; purple lines show the transitions between the beads; and yellow lines show approach and return movements.

перестроения карты осей появилось отклонение ориентации инструмента от заданной на несколько градусов, однако это решило проблему ограничения шестой оси.

На третьем этапе разработали постпроцессор для перевода полученных траекторий в управляющую программу для робота-манипулятора. Для работы с постпроцессорами в СПРУТКАМ есть специальная утилита «Генератор постпроцессоров». В стандартной библиотеке утилиты был постпроцессор для работы с роботами производства Kawasaki. Этот постпроцессор был взят за основу и доработан для работы со сварочным роботом. Были добавлены команды старта и окончания наплавки, а также создана подпрограмма для работы с двухосевым позиционером, как показано в работе [3]. После доработки постпроцессора была сгенерирована управляющая программа на языке AS language, готовая к загрузке в контроллер робота-манипулятора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После полученная из СПРУТКАМ управляющая программа была успешно загружена в контроллер робота-манипулятора и выполнена без ошибок.

В результате выполнения управляющей программы была выращена заготовка топорика, на поверхности которой имелись глубокие поры и наплывы. Время, затраченное на процесс выращивания, составило шесть часов, что говорит о низкой производительности процесса наплавки. Это связано с несколькими недостатками выбранной стратегии и параметрами выращивания:

- неправильная ориентация рабочего инструмента в процессе выращивания. Горелка в процессе выращивания была расположена перпендикулярно оси симметрии топорика. Из-за остаточных напряжений в проволоке после выхода из катушки, в которую она намотана, проволока выходит из наконечника не соосно соплу. Это привело к образованию большого количества капель на одной из сторон топорика. Решением проблемы может быть установка ориентации горелки вдоль оси симметрии топорика, тогда обе стенки будут одинакового качества, а образование капель будет наблюдаться только на пятке топорика либо со стороны лезвия, которое впоследствии будет механически обрабатываться. Еще одним решением является установка роликов для выпрямления проволоки после выхода из катушки. Сориентировать горелку таким образом, чтобы проволока входила в ванну расплава перпендикулярно не является удачным решением, поскольку в таком случае защитный газ, выходящий из сопла, не будет равномерно распределяться вокруг сварочной ванны;
- неправильно выбранная стратегия выращивания. Угол поворота заполнения между слоями следует изменить на 90° вместо 180° — это приведет

к лучшей сплавляемости слоев между собой и образованию меньшего количества пор внутри изделия. Возможным способом решения данной проблемы является изменение стратегии заполнения на «змейку» вместо параллельных проходов — это ускорит процесс заполнения одного слоя, однако приведет к большим тепловложениям. Еще одним вариантом решения проблемы может стать изменение порядка заполнения и наплавки контура. Из-за того, что контур наплавлялся в последнюю очередь в рамках одного слоя, часть металла из-за перегрева стекала на стенки топорика, что приводило к дефектам на поверхности топорика. Для решения этой проблемы стоит поменять очередность наплавки контура и заполнения;

- большое количество передаваемой погонной энергии. Даже при заполнении параллельными проходами наблюдался перегрев сварочной ванны на некоторых слоях изделия. Это приводило к большому количеству брызг и образованию пор внутри изделия. Уменьшения погонной энергии можно добиться за счет изменения режима сплавления либо использования технологии CMT (Cold Metal Transfer) на сварочном источнике. В случае, если указанные решения невозможно выполнить, следует увеличивать время технологических пауз как между слоями, так и между параллельными проходами, что приведет к еще большему уменьшению производительности процесса наплавки.

После выращивания заготовка топорика была срезана с подложки и подвергнута механической обработке. Реплика топорика до и после механической обработки представлена на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило возможность применения САМ-системы СПРУТКАМ для автоматизации процесса генерации управляющих программ для ЭДВ.



Рис. 5. Реплика средневекового топорика, выращенная по технологии электродугового выращивания с помощью СПРУТКАМ: *a* — заготовка до механической обработки; *b* — заготовка после механической обработки.

Fig. 5. Copy of a medieval axe handle made by wire and arc additive manufacturing using SPRUTCAM: *a*, blank before machining; *b*, blank after machining.

Несмотря на достигнутые результаты, выявлен ряд проблем, связанных с качеством поверхности, пористостью и производительностью процесса. Для улучшения результатов необходимо оптимизировать параметры режима сплавления, выбрать оптимальную стратегию выращивания и провести более детальный анализ тепловых процессов. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований в области автоматизации аддитивных технологий и повышения качества получаемых изделий.

Результаты работы демонстрируют потенциал использования СПРУТКАМ для промышленного применения ЭДВ и подчеркивают необходимость дальнейшей оптимизации параметров процесса, что открывает перспективы для автоматизации и стандартизации технологии [4].

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: И.Д. Бородин — провел исследование, разработал постпроцессор для СПРУТКАМ, написал текст статьи; В.Г. Смелов — разработал концепцию исследования;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курушкин Д.В., Мушников И.В., Панченко Е.В., и др. 3D печать металлических изделий. Особенности применения электродуговой наплавки // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. 2021. № 6. С. 88–91. EDN: FBLYXR
2. Treutler K., Wesling V. The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review // Appl Sci. 2021. Vol. 11, N 18. ID 8619. doi: 10.3390/app11188619

REFERENCES

1. Kurushkin DV, Mushnikov IV, Panchenko EV, et al. 3D printing of metal products. Features of application of electric arc cladding. *Business Journal NEFTEGAZ.RU*. 2021;(6):88–91. EDN: FBLYXR (In Russ.)
2. Treutler K, Wesling V. The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review. *Appl Sci*. 2021;11(18):8619. doi: 10.3390/app11188619

ОБ АВТОРАХ

***Илья Дмитриевич Бородин**, магистр;
адрес: Россия, 443086, Самара, Московское ш., д. 34;
e-mail: crysisilya@yandex.ru

Зафар Ильясович Гимранов, младший научный сотрудник;
e-mail: zafargimranov86@gmail.com

Максим Андреевич Олейник, аспирант;
eLibrary SPIN: 8597-3533; e-mail: oleynik1997@mail.ru

Виталий Геннадиевич Смелов, канд. техн. наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2504-9185; ORCID: 0000-0001-9556-6290;
e-mail: smelov@ssau.ru

З.И. Гимранов — провел исследование, произвел анализ полученных результатов; М.А. Олейник — редактирование статьи, визуализация статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: I.D. Borodkin, conducted the research, developed a postprocessor for SprutCAM, and wrote the article text; V.G. Smelov, developed the research concept; Z.I. Gimranov, conducted the research and performed analysis of the obtained results; M.A. Oleinik, article editing and visualization.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

3. Олейник М.А., Хаймович А.И., и др. Математическая модель кинематики промышленного робота, оснащенного двухосевым позиционером // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. Т. 25, № 1. С. 77–84. EDN: DLDHIT
4. Rodrigues T.A., Duarte V., Miranda R.M., et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM) // Materials. 2019. Vol. 12, N 7. ID 1121. doi: 10.3390/ma12071121

3. Oleynik MA, Khaimovich AI, et al. Mathematical model of kinematics of an industrial robot equipped with a two-axis positioner. *Vestnik UGATU*. 2021;25(1):77–84. EDN: DLDHIT

4. Rodrigues TA, Duarte V, Miranda RM, et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*. 2019;12(7):1121. doi: 10.3390/ma12071121

AUTHORS' INFO

***Ilya D. Borodkin**, Master's Degree student;
address: 34 Moskovskoe hwy, Samara, 443086, Russia;
e-mail: crysisilya@yandex.ru

Zafar I. Gimranov, junior research associate;
e-mail: zafargimranov86@gmail.com

Maksim A. Oleinik, postgraduate student;
eLibrary SPIN: 8597-3533; e-mail: oleynik1997@mail.ru

Vitaliy G. Smelov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
eLibrary SPIN: 2504-9185; ORCID: 0000-0001-9556-6290;
e-mail: smelov@ssau.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 62-5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_97

Научный обзор

Порошковая лазерная наплавка как элемент системы машиностроения индустрии 4.0

А.А. Вознесенская, Р.В. Чкалов, А.В. Киреев, А.С. Разносчиков, Д.А. Кочуев

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрена проблема подачи порошкового материала для систем лазерной наплавки в соответствии с требованиями цифровизации современного производства, представлен обзор существующих конструкций, их преимущества и недостатки. Целью обзора было по имеющимся литературным данным представить концепцию системы подачи порошка, повышающую общую технологичность, контроль и автоматизацию процесса наплавки. Рассмотрены основные проблемы систем подачи порошкового материала, приводящие к определенным технологическим трудностям современного производства и повышающие долю последующей механической обработки в технологическом процессе, а также пути решения проблем порошковой подачи материала в зону лазерной наплавки. Представлены ключевые аспекты, связанные с работой систем подачи порошкового материала, приводятся рекомендации для проектирования оптимальной системы подачи порошкового материала в зону лазерного воздействия, приближающей технологию порошковой наплавки к системам, соответствующим индустрии 4.0. На основе обзора предложена концепция системы подачи порошка, повышающая общую технологичность, контроль и автоматизацию процесса наплавки. Цифровизация процесса достигается за счет использования системы датчиков и снижения инерционности процесса подачи порошкового материала путем оптимизации конструкции подающего механизма и места расположения дозирующего узла в системе порошковой лазерной наплавки.

Ключевые слова: аддитивные технологии; порошковый материал; система подачи порошкового материала; лазерная наплавка, градиентные материалы.

Как цитировать

Вознесенская А.А., Чкалов Р.В., Киреев А.В., Разносчиков А.С., Кочуев Д.А. Порошковая лазерная наплавка как элемент системы машиностроения индустрии 4.0 // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 97–106. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_97

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_97

Review

Powder laser cladding as a component of Industry 4.0 machine building systems

Anna A. Voznesenskaya, Ruslan V. Chkalov, Andrey V. Kireev,
Artem S. Raznoschikov, Dmitriy A. Kochuev

Vladimir State University, Vladimir, Russia

ABSTRACT

This article examines the problem of feeding powder material to laser cladding systems based on state-of-the-art industrial digital transformation standards and presents an overview of existing designs, their advantages and disadvantages. Based on the review, to propose a powder feed system concept that improves the overall cladding performance, control, and automation. The article reviews the main issues related to powder feed system that lead to certain process difficulties in the contemporary industry and increase the amount of subsequent machining in the process. The article reviews approaches to solving the problems of powder feeding to the laser cladding area. The article discusses key aspects related to powder feed systems and provides advice on designing an improved system to feed powder to the laser impact area, bringing powder cladding technology closer to Industry 4.0 systems. Based on the review, the authors propose a powder feed system concept that improves the overall cladding performance, control and automation. Digital process transformation is achieved by the use of a sensor system and reduced inertia of the powder feed process by improving the feed system design and the dosing unit location in the laser cladding powder system.

Keywords: additive technologies; powder material; powder supply system; laser cladding; functionally graded materials.

To cite this article

Voznesenskaya AA, Chkalov RV, Kireev AV, Raznoschikov AS, Kochuev DA. Powder laser cladding as a component of Industry 4.0 machine building systems. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):97–106. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_97

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Концепция индустрии четвертой промышленной революции предполагает глубокую информатизацию производственных процессов. Бурно развивающаяся отрасль аддитивного производства, в частности прямой лазерной порошковой наплавки, предполагает автоматизацию и информатизацию процесса получения деталей [1, 2]. Стремительно развивающееся направление наплавки и 3D-печати изменило подход не только к построению конструктивных элементов и узлов, но и к получению материалов, обладающих заданными свойствами. Для достижения требуемых свойств наплавляемых слоев используются лазерные методы обработки [3–6]. Использование лазерного излучения (ЛИ) превосходит иные методы подвода энергии в зону обработки ввиду высокой когерентности, направленности, высокой плотности энергии лазерного излучения, высокой локальности и прогнозирования воздействия, низкой зоны термического влияния (ЗТВ). Лазерная наплавка используется в различных отраслях промышленности: металлургической, аэрокосмической, горнодобывающей, автомобильной, судостроительной. Процесс лазерной наплавки с использованием порошкового материала является эффективным методом ремонта, восстановления, функционализации поверхностей, создания новых деталей. В современном технологическом исполнении спектр применяемых материалов очень широк. Путем использования нескольких систем подачи возможно получение сложных структур, обеспечивающих значительное расширение технологичности производства.

Получение градиентных материалов осуществимо благодаря таким преимуществам, как смешивания двух или более типов порошков, контроль скорости подачи каждого потока порошка и гибкость в управлении другими рабочими параметрами [6–10]. Мощность источника лазерного излучения, скорость обработки и скорость подачи порошка оказывают значительное влияние на качество наплавочного слоя [11]. Эти параметры предоставляют наиболее широкие возможности для изменения и улучшения свойств наносимого слоя [12]. Если параметры процесса не соответствуют требованиям, в наносимых слоях могут появиться дефекты, такие как поры и трещины. Таким образом, для достижения желаемых результатов необходимо эффективно контролировать параметры процесса [13–15]. Прогнозирование свойств материала возможно как посредством изменения параметров лазерного излучения в процессе лазерной порошковой наплавки, так и путем использования разных материалов, что представлено на рис. 1 в виде схемы.

Подачу порошка в зону лазерного воздействия для прямого лазерного выращивания можно разделить на три отдельных этапа: дозирование порошка, транспортировка порошка и доставка порошка непосредственно в зону лазерного воздействия.

Первый этап дозирования порошка включает измерение нужного количества порошка из системы подачи порошка в ванну расплава. Второй этап включает транспортировку порошка из системы подачи в сопло, что осуществляется инертным газом-носителем. Третий этап осуществляется с помощью сопла непосредственно в зону

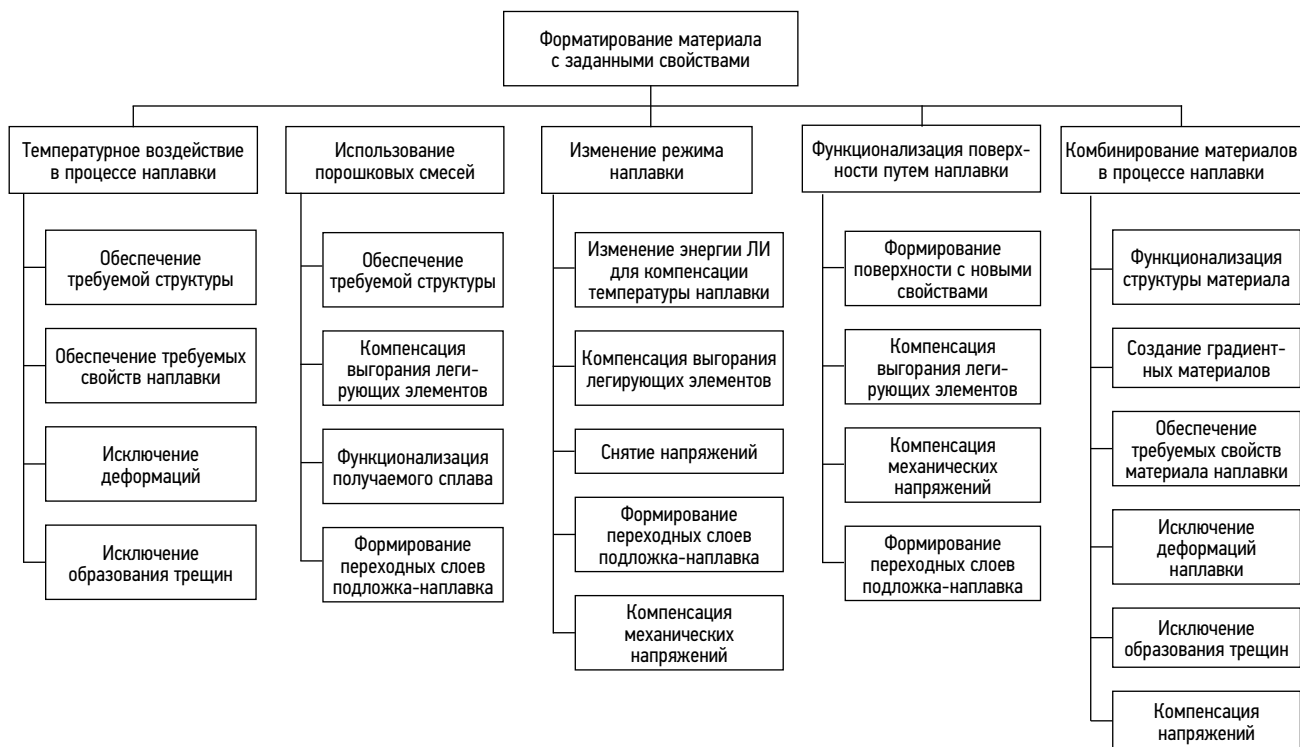


Рис. 1. Схема формирования свойств материала в процессе лазерной порошковой наплавки. ЛИ — лазерное излучение.

Fig. 1. Development of material properties during laser powder cladding. ЛИ, laser emitted light.

лазерного воздействия. Важно отметить, что проводится четкое различие между дозированием порошка, транспортировкой и доставкой, и они зависят от конструкции используемого оборудования [16, 17].

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для дозирования и транспортировки порошковых материалов можно использовать разные способы подачи. Каждый из этих способов реализуется в виде разных конструкций. В данной работе представлен обзор существующих решений, концепция подающего устройства, преимущества и недостатки по сравнению с системами, использующими протяженные подающие магистрали.

В работе [18] выявили влияние взаимодействия между распределением порошка и расплавом на геометрию наносимого слоя. Авторы [19] устранили явление избыточного давления и получили более однородную геометрию наплавленного слоя, мгновенно отрегулировав расход порошка на выходе из сопла. В работе [20] представлена система управления, основанная на мгновенном регулировании потока порошка. Преимуществом данной системы является то, что поток порошка можно остановить, когда наплавка материала не осуществляется. Следовательно, количество лишнего порошка уменьшается, и это делает процесс лазерного послыоного нанесения более экономичным и бездефектным.

Один из видов винтовой подачи порошка, разработанный авторами [21], включает в себя осевой вибрационный шнек, способствующий процессу транспортировки. Другая конструкция, из работы [22], состоит из приводимого в действие двигателем шнека, который проталкивает определенное количество порошка (функция скорости вращения шнека) в газовую камеру. Поток инертного газа подхватывает дозированный порошок из газовой камеры и переносит его к соплу подачи.

Авторы [23] предложили комбинацию осевой и радиальной вибрации для транспортировки мелкозернистого материала. Во время прямого хода цикла вибрации материал проталкивается вперед. Однако при обратном ходе радиальная вибрация поднимает частицы порошка с поверхности, тем самым достигая транспортировки материала в одном направлении.

ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМ ПОДАЧИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Использование порошковых материалов в аддитивном производстве позволяет с высокой точностью воспроизводить формируемый контур, соответствующий требуемому, с учетом некоторых ограничений: ширина и высота формируемого валика определяются параметрами оптической головки, подающего сопла; время, необходимое для начала наплавки и окончания операции

обработки заданного сегмента поверхности, определяется конфигурацией системы подачи порошкового материала.

Конфигурация системы подачи порошкового материала является фактором, определяющим назначение наплавочного оборудования. Существуют системы подачи, расположенные за пределами зоны наплавки и размещаемые непосредственно на оптической головке. В обеих системах есть как преимущества, так и недостатки. Устройства подачи порошкового материала, вынесенные за пределы зоны наплавки, зачастую представляют собой достаточно габаритные установки. Большие габариты систем подачи порошкового материала позволяют иметь большой запас порошкового материала, размещать на таких установках системы подготовки газов, питания и управления данным оборудованием. Обслуживание данной системы также не вызывает трудностей ввиду свободного доступа к элементам и узлам подающего устройства. Недостатком является наличие протяженной порошковой транспортирующей магистрали. Протяженность транспортировочной порошковой магистрали накладывает ограничения на технологический процесс наплавки: время задержки от начала подачи порошкового материала до его выхода из сопла и стабилизации данного процесса; продувки магистрали для исключения засоров; также нередкими являются пульсации подачи и накопление значительного статического заряда. Величина задержки подачи порошкового материала определяется исходя из перемещения гранул порошкового материала от дозирующего узла до выхода из сопла. Время стабилизации порошкового потока до номинального уровня, установленного в системе управления податчиком порошкового материала при длине магистрали от 5 до 10 м, составляет 4–15 с. Скорость газового потока в зависимости от режима наплавки составляет от 4 до 15 м/с. Стабилизация подачи порошкового материала сильно зависит от протяженности магистрали и имеет некоторый нелинейный характер. Увеличение протяженности магистрали, в том числе перегибы, жесткость крепления приводят к изменению времени стабилизации порошкового потока (снижение пульсаций). Данная величина, помимо особенностей порошковой магистрали, зависит также и от пикнометрических характеристик используемой порошковой смеси. Смеси, содержащие гранулы оксидной формы, перемещаются по порошковой магистрали лучше, нежели частицы, имеющие осколькоатую форму. Форма частиц порошка в какой-то степени является определяющим фактором величины задержки на подачу порошкового материала и последующей продувки [23]. Продувка магистрали необходима для исключения накопления порошка в магистрали. Наличие порошка в магистрали при последующем акте подачи приводит к закупориванию подающего рукава, последующему демонтажу и чистке. Совокупность этих факторов приводит к усложнению использования технологии лазерной наплавки — от дополнительных издержек, связанных

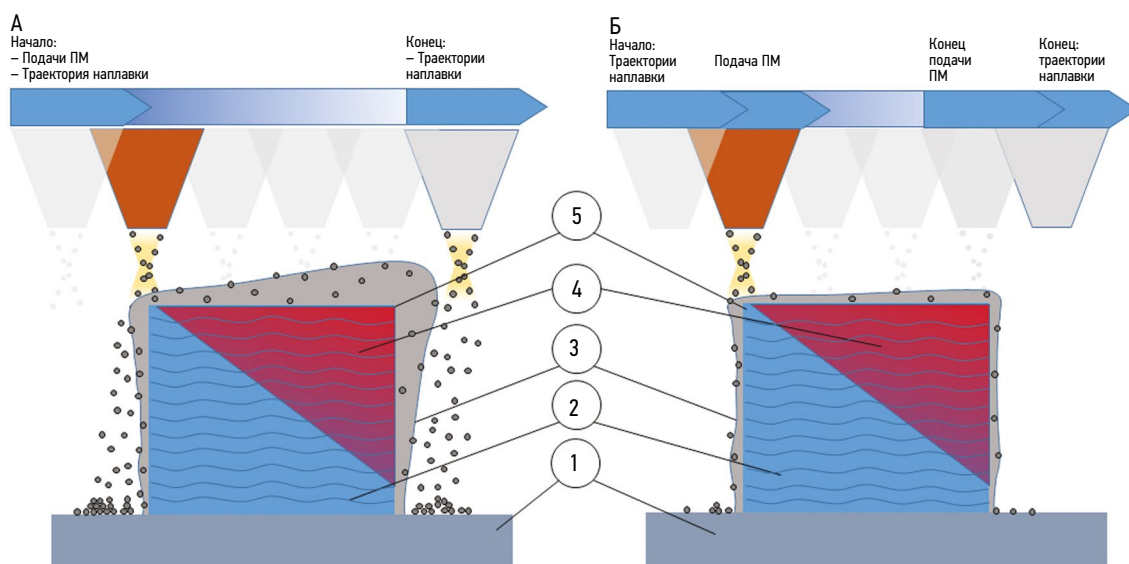


Рис. 2. Подача порошкового материала в процессе лазерной наплавки: А — непрерывная; Б — дифференцированная (безынерционная) подача порошка в процессе лазерной наплавки, где 1 — обрабатываемая (подогреваемая) подложка, 2 — наплавляемая структура (на горячую подложку), 3 — материал наплавки, подверженный последующему удалению, 4 — рост начальной температуры каждого последующего слоя до температуры, вызывающей налипание гранул порошкового материала, 5 — контур предполагаемой наплавляемой структуры. ПМ — порошковый материал.

Fig. 2. Powder feeding during laser cladding: A, continuous feeding; B, differentiated (instantaneous) powder feeding during laser cladding, where 1 is the processed (heated) substrate, 2 is the deposited structure (onto hot substrate), 3 is the deposited material to be removed, 4 is the increase of the initial temperature of each subsequent layer to the temperature of adhesion of powder granules, 5 is the outline of the proposed deposited structure. ПМ — порошковый материал.

с последующей механической обработкой, до образования дефектов в виде пор, трещин, несплавлений, шлаковых включений. Обозначенные дефекты наблюдаются при нарушении режима наплавки, несоответствии подводимой в зону воздействия энергии количеству поданного порошкового материала.

Данные особенности не оказывают негативного влияния на технологический процесс, для которого характерна непрерывная длительная подача порошкового материала в зону обработки. При использовании систем подачи порошка, вынесенных за пределы наплавочной головки, при необходимости обработки с периодическими сменами участков лазерной наплавки на предварительно нагретые поверхности (рис. 2), характерно формируют большие участки паразитного материала, свойства которого отличаются от требуемого при наплавке. Данные наплывы вызваны разогревом поверхности и налипанием гранул порошкового материала, иногда с частичным оплавлением.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Концепция системы подачи порошкового материала, отвечающая требованиям четвертой технологической революции, должна обладать набором датчиков, осуществляющих контроль настоящего состояния. Основными параметрами контроля являются: давление в транспортировочной магистрали; наличие порошка в магистрали; расход порошкового материала; наполненность бункера;

наличие алгоритмов управления, учитывающих инерционность подачи порошкового материала от дозирующего узла до зоны наплавки. На рис. 3 представлен алгоритм работы устройства подачи порошкового материала в зону обработки. Блок «управляющий сигнал» предполагает получение цифрового/аналогового сигнала о начале или завершении операции технологического цикла. Ввод параметров работы устройства возможно осуществлять по протоколу Modbus ASCII/Modbus TCP, записи соответствующих параметров в память устройства. Помимо управляющих параметров, возможен ввод контролируемых параметров, таких как заполнение бункера, давление транспортировочного газа в магистрали, расход порошкового материала, существует возможность задавать состояния системы для получения предупреждений. Состояния устройства в процессе работы (блок алгоритма «вывод/запись информации состояния») сохраняются в памяти в виде семплов, ограниченных по объему данных, имеющих привязку ко времени. Доступ возможен путем физического извлечения модуля памяти или обращения по протоколу Modbus. Приоритет выполнения операции установлен по внешнему сигналу. Помимо выполнения операции, возможен запрос изменения состояния данных (уровня контролируемых параметров датчиков).

Необходимым условием цифрового производства является система обмена данными между всеми элементами комплекса наплавки. Данный перечень свойств позволит в значительной степени оцифровать производственный

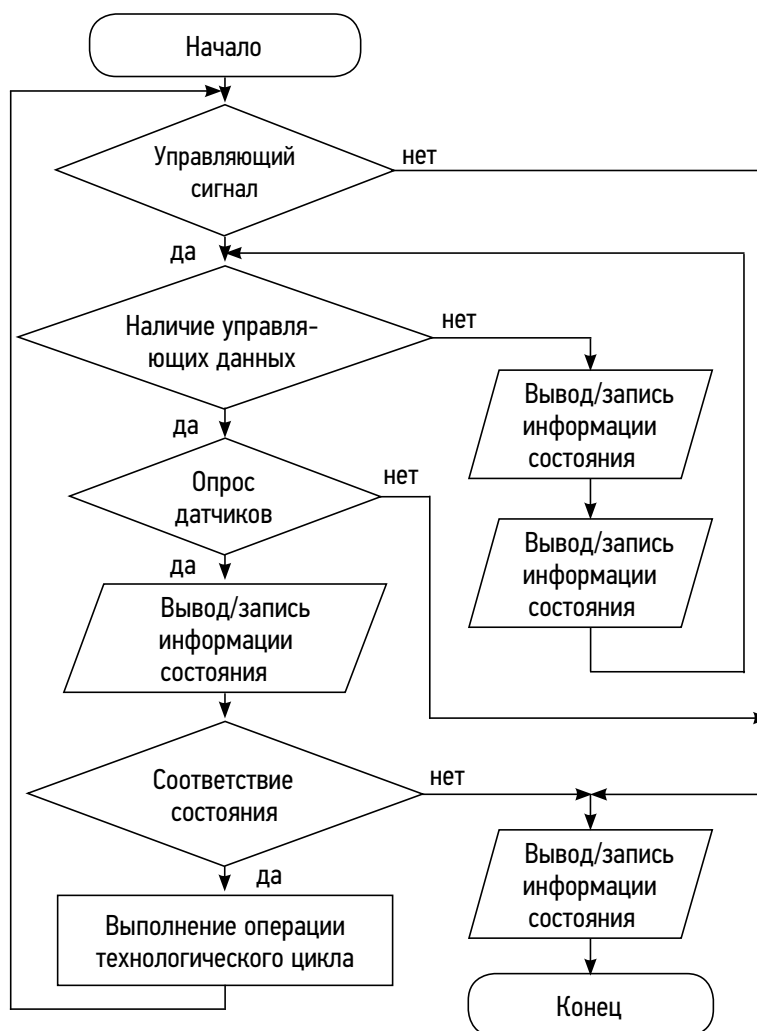


Рис. 3. Алгоритм управления системой подачи порошка.
Fig. 3. Powder feeding system control algorithm.

процесс. Подавляющее большинство систем подачи порошкового материала имеют некоторые свойства из приведенного перечня. Наиболее эффективными с точки зрения инерционности процесса подачи являются решения с дозирующим блоком, расположенным непосредственно на наплавной головке. Дозирующий узел устройства подачи порошкового материала должен представлять собой компактное решение, имеющее минимальную массу (рис. 4).

Для систем порошковой наплавки требование к массе последнего звена используемых роботизированных манипуляторов является определяющим используемое навесное оборудование. Уменьшение общих габаритов системы подачи порошкового материала для размещения на наплавочной головке реализуется путем отказа от рудиментных технологических решений, а именно использования универсальных промышленных контроллеров, номенклатуры блоков питания, преобразователей сигналов, использования стандартных технологических решений построения шкафов автоматики, габаритных, металлоемких корпусов, что влечет ограничения объема

бункера порошкового материала. Данное ограничение эффективно масштабируется за счет применения каскадных систем подачи: наполнение дозирующего узла, расположенного на наплавочной головке, по мере необходимости осуществляется из внешнего подающего устройства, расположенного за пределами области обработки. Каскадная система подачи справедлива как для стационарных систем, так и для мобильных. При использовании ручных систем порошковой лазерной наплавки протяженная порошковая магистраль приводит к значительному увеличению трудоемкости, связанной с ожиданием стабилизации порошкового потока, производственным издержкам, связанным с холостым расходом порошков [24]. Издержки выражаются в увеличении времени техпроцесса, перерасходе порошкового материала, повышении трудоемкости операции ручной наплавки. Размещение дозирующего блока непосредственно у сопла наплавочной головки позволяет корректировать режим подачи порошкового материала в зависимости от теплового состояния обрабатываемой поверхности, от обрабатываемой геометрии. Получать воспроизводимый результат наплавки

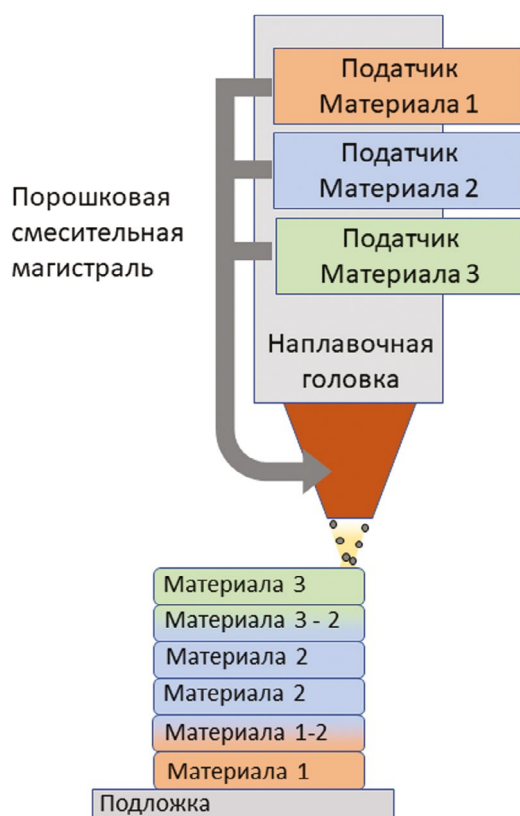


Рис. 4. Компоновочное решение размещения дозирующего узла на наплавочной головке.
Fig. 4. Layout arrangement of the dosing unit on the cladding head.

возможно только при условии наличия информационной системы обмена данными, анализа данных, управления устройствами, входящими в единую информационную систему, с полным исключением случайных факторов в технологическом процессе. Результатом реализации данной концепции является значительное снижение инерционности системы, снижение общих габаритов и расширение общего функционала, повышение эффективности использования материальных, технологических и временных ресурсов предприятия.

Представленная концепция может быть применима для получения градиентных структур и структур разнородных материалов. Это достигается за счет использования нескольких подающих устройств, порошковые магистрали которых объединяются в сопловой части наплавочной головки, вносящей порошок материал в зону воздействия лазерного луча. Организация методов комбинации нескольких устройств подачи порошковых материалов в одном технологическом процессе требует наличия в информационной системе алгоритмов: взаимодействия систем подачи; отношения их смешивания; совокупного влияния газовых потоков, инерционной составляющей системы перемещения подачи; контроля тепловых и гидродинамических процессов, протекающих непосредственно в зоне наплавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование любой технологии требует глубокого понимания участвующих в ней процессов. Повышение эффективности каждого из процессов приблизит технологии к полной автоматизации и цифровизации производств. На основе анализа существующих устройств для доставки порошковых материалов в зону лазерного воздействия, а также с учетом проблемных моментов этих устройств сформировано понимание оптимальной системы подачи порошкового материала, которая удовлетворила бы потребности промышленности в рамках индустрии 4.0. Основой для построения технологических установок, соответствующих требованиям четвертой технологической революции, должны стать: обмен данными всех систем, осуществляющих непосредственное влияние на процесс наплавки; прогнозируемый ресурс элементов дозирующего узла и запаса порошкового материала; анализ расхода газов, порошкового материала и теплового состояния обрабатываемой поверхности; коррекция технологического режима в процессе наплавки согласно алгоритмам коррекции; исключение человеческого фактора из технологического процесса обработки; ведение цифровой истории обработки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: А.А. Вознесенская — разработка концепции; Д.А. Кочуев — научное руководство; Р.В. Чкалов — программно-аппаратная разработка; А.В. Киреев — технологическое сопровождение; А.С. Разносчиков — разработка конструкции.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: A.A. Voznesenskaya, concept development; D.A. Kochuev, scientific management; R.V. Chkalov, software and hardware development; A.V. Kireev, technological support; A.S. Raznoschikov, design development.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Systems engineering in the fourth industrial revolution: Big data, novel technologies, and modern systems engineering / R.S. Kenett, R.S. Swarz, A. Zonnenshain, editors. John Wiley and Sons, 2019. 611 p. doi: 10.1002/9781119513957
2. Wang H., Liu W., Tang Z., et al. Review on adaptive control of laser-directed energy deposition // *Opt Eng.* 2020. Vol. 59, N 7. ID 070901. doi: 10.1117/1.OE.59.7.070901
3. Kladosasilakis N., Charalampous P., Kostavelis I., et al. Impact of metal additive manufacturing parameters on the powder bed fusion and direct energy deposition processes: A comprehensive review // *Prog Addit Manuf.* 2021. Vol. 6. P. 349–365. doi: 10.1007/s40964-021-00180-8
4. Ghanavati R., Lannunziata E., Norouzi E., et al. Design and development of SS316L-IN718 functionally graded materials via laser powder bed fusion // *Mater Lett.* 2023. Vol. 349. ID 134793. doi: 10.1016/j.matlet.2023.134793
5. Parihar R.S., Setti S.G., Sahu R.K. Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review // *Sci Eng Compos Mater.* 2018. Vol. 25, N 2. P. 309–336. doi: 10.1515/secm-2015-0395
6. Voznesenskaya A.A., Raznoschikov A.S., Galkin A.F., et al. Distribution of laser radiation in opaque porous media // *J Phys Conf Ser.* 2022. Vol. 2316, N 1. ID 012018. doi: 10.1088/1742-6596/2316/1/012018
7. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // *Acta Materialia.* 2016. Vol. 117. P. 371–392. doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019
8. Demir A.G., Kim J., Caltanissetta F., et al. Enabling multi-material gradient structure in laser powder bed fusion // *J Mater Process Technol.* 2022. Vol. 301. ID 117439. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117439
9. Errico V., Posa P., Fusco A., et al. Intralayer multi-material structure stainless-steel/nickel-superalloy fabricated via laser-powder bed fusion process // *Manuf Lett.* 2023. Vol. 35. P. 11–15. doi: 10.1016/j.mfglet.2022.11.004
10. Chernikov A.S., Voznesenskaya A.A., Davydov N.N., et al. Gradient materials formation by laser cladding of powder compositions // *J Phys Conf Ser.* 2018. Vol. 1109, N 1. ID 012062. doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012062
11. Goodarzi D.M., Pekkarinen J., Salminen A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry // *Weld World.* 2017. Vol. 61. P. 883–891. doi: 10.1007/s40194-017-0495-0
12. Bax B., Rajput R., Kellet R., Reisacher M. Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition // *Addit Manuf.* 2018. Vol. 21. P. 487–494. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.002
13. Janicki D. Laser cladding of Inconel 625-based composite coatings reinforced by porous chromium carbide particles // *Opt Laser Technol.* 2017. Vol. 94. P. 6–14. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.03.007
14. Fu F., Zhang Y., Chang G., Dai J. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors // *Optik.* 2016. Vol. 127, N 1. P. 200–202. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.043
15. Balu P., Leggett P., Hamid S., Kovacevic R. Multi-response optimization of laser-based powder deposition of multi-track single layer hastelloy C-276 // *Mater Manuf Process.* 2013. Vol. 28, N 2. P. 173–182. doi: 10.1080/10426914.2012.677908
16. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means—A perspective // *Particuology.* 2012. Vol. 10, N 4. P. 397–427. doi: 10.1016/j.partic.2012.06.002
17. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process // *Opt Lasers Eng.* 2004. Vol. 41, N 6. P. 849–867. doi: 10.1016/S0143-8166(03)00063-0
18. Arrizubieta J.I., Lamikiz A., Cortina M., et al. Hardness, grain size and porosity formation prediction on the Laser Metal Deposition of AISI 304 stainless steel // *Int J Mach Tools Manuf.* 2018. Vol. 135. P. 53–64. doi: 10.1016/j.ijmactools.2018.08.004

19. Tan H., Shang W., Zhang F., et al. Process mechanisms based on powder flow spatial distribution in direct metal deposition // *J Mater Process Technol.* 2018. Vol. 254. P. 361–372. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.026

20. Arrizubieta J.I., Martínez S., Lamikiz A., et al. Instantaneous powder flux regulation system for Laser Metal Deposition // *J Manuf Process.* 2017. Vol. 29. P. 242–251. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.018

21. Jinping Q., Baoshan S., Yanhong F., Hezhi H. Dependence of solids conveying on screw axial vibration in single screw extruders // *J Appl Polym Sci.* 2006. Vol. 102, N 3. P. 2998–3007. doi: 10.1002/app.24658

22. Weerasinghe V.M. Laser cladding with pneumatic powder delivery. В кн.: *Applied laser tooling* / V.M. Weerasinghe, W.M. Steen, editors. Dordrecht: Springer Netherlands. 1987. P. 183–211. doi: 10.1007/978-94-009-3569-3

23. Winkler G. Analysing the vibrating conveyor // *Int J Mech Sci.* 1978. Vol. 20, N 9. P. 561–570. doi: 10.1016/0020-7403(78)90014-0

24. Soshi M., Yau C., Kusama R. Development and evaluation of a dynamic powder splitting system for the directed energy deposition (DED) process // *CIRP Annals.* 2020. Vol. 69, N 1. P. 341–344. doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.048

REFERENCES

1. Kenett RS, Swarz RS, Zonnenshain A, editors. *Systems engineering in the fourth industrial revolution: Big data, novel technologies, and modern systems engineering.* John Wiley and Sons; 2019. 611 p. doi: 10.1002/9781119513957

2. Wang H, Liu W, Tang Z, et al. Review on adaptive control of laser-directed energy deposition. *Opt Eng.* 2020;59(7):070901. doi: 10.1117/1.OE.59.7.070901

3. Kladovasilakis N, Charalampous P, Kostavelis I, et al. Impact of metal additive manufacturing parameters on the powder bed fusion and direct energy deposition processes: A comprehensive review. *Prog Addit Manuf.* 2021;6:349–365. doi: 10.1007/s40964-021-00180-8

4. Ghanavati R, Lannunziata E, Norouzi E, et al. Design and development of SS316L-IN718 functionally graded materials via laser powder bed fusion. *Mater Lett.* 2023;349:134793. doi: 10.1016/j.matlet.2023.134793

5. Parihar RS, Setti SG, Sahu RK. Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review. *Sci Eng Compos Mater.* 2018;25(2):309–336. doi: 10.1515/secm-2015-0395

6. Voznesenskaya AA, Raznoschikov AS, Galkin AF, et al. Distribution of laser radiation in opaque porous media. *J Phys Conf Ser.* 2022;2316(1):012018. doi: 10.1088/1742-6596/2316/1/012018

7. Herzog D, Seyda V, Wycisk E, Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia.* 2016;117:371–392. doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019

8. Demir AG, Kim J, Caltanissetta F, et al. Enabling multi-material gradient structure in laser powder bed fusion. *J Mater Process Technol.* 2022;301:117439. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117439

9. Errico V, Posa P, Fusco A, et al. Intralayer multi-material structure stainless-steel/nickel-superalloy fabricated via laser-powder bed fusion process. *Manuf Lett.* 2023;35:11–15. doi: 10.1016/j.mfglet.2022.11.004

10. Chernikov AS, Voznesenskaya AA, Davydov NN, et al. Gradient materials formation by laser cladding of powder compositions. *J Phys Conf Ser.* 2018;1109(1):012062. doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012062

11. Goodarzi DM, Pekkarinen J, Salminen A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry. *Weld World.* 2017;61:883–891. doi: 10.1007/s40194-017-0495-0

12. Bax B, Rajput R, Kellet R, Reisacher M. Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition. *Addit Manuf.* 2018;21:487–494. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.002

13. Janicki D. Laser cladding of Inconel 625-based composite coatings reinforced by porous chromium carbide particles. *Opt Laser Technol.* 2017;94:6–14. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.03.007

14. Fu F, Zhang Y, Chang G, Dai J. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors. *Optik.* 2016;127(1):200–202. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.043

15. Balu P, Leggett P, Hamid S, Kovacevic R. Multi-response optimization of laser-based powder deposition of multi-track single layer hastelloy C-276. *Mater Manuf Process.* 2013;28(2):173–182. doi: 10.1080/10426914.2012.677908

16. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means — A perspective. *Particuology.* 2012;10(4):397–427. doi: 10.1016/j.partic.2012.06.002

17. Toyserkani E, Khajepour A, Corbin S. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process. *Opt Lasers Eng.* 2004;41(6):849–867. doi: 10.1016/S0143-8166(03)00063-0

18. Arrizubieta JI, Lamikiz A, Cortina M, et al. Hardness, grain size and porosity formation prediction on the Laser Metal Deposition of AISI 304 stainless steel. *Int J Mach Tools Manuf.* 2018;135:53–64. doi: 10.1016/j.ijmactools.2018.08.004

19. Tan H, Shang W, Zhang F, et al. Process mechanisms based on powder flow spatial distribution in direct metal deposition. *J Mater Process Technol.* 2018;254:361–372. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.026

20. Arrizubieta JI, Martínez S, Lamikiz A, et al. Instantaneous powder flux regulation system for Laser Metal Deposition. *J Manuf Process.* 2017;29:242–251. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.018

21. Jinping Q, Baoshan S, Yanhong F, Hezhi H. Dependence of solids conveying on screw axial vibration in single screw extruders. *J Appl Polym Sci.* 2006;102(3):2998–3007. doi: 10.1002/app.24658

22. Weerasinghe VM. Laser cladding with pneumatic powder delivery. In: Weerasinghe VM, Steen WM, editors. *Applied laser tooling.* Dordrecht: Springer Netherlands; 1987. P. 183–211. doi: 10.1007/978-94-009-3569-3

23. Winkler G. Analysing the vibrating conveyor. *Int J Mech Sci.* 1978;20(9):561–570. doi: 10.1016/0020-7403(78)90014-0

24. Soshi M, Yau C, Kusama R. Development and evaluation of a dynamic powder splitting system for the directed energy deposition (DED) process. *CIRP Annals.* 2020;69(1):341–344. doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.048

ОБ АВТОРАХ

***Анна Алексеевна Вознесенская**, ассистент;
адрес: Россия, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87;
ORCID: 0000-0002-8739-5230; eLibrary SPIN: 6796-3190;
e-mail: 2obk@bk.ru

Руслан Владимирович Чкалов, младший научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 6129-1620; ORCID: 0000-0003-2307-0901;
e-mail: j.larenax@gmail.com

Андрей Викторович Киреев, заведующий лабораториями;
eLibrary SPIN: 4936-2326;
e-mail: ariant-tp@mail.ru

Артём Сергеевич Разносчиков, ассистент;
eLibrary SPIN: 5834-7047;
e-mail: raznoschikoff.ar@yandex.ru

Дмитрий Андреевич Кочуев, канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер;
eLibrary SPIN: 3652-9748;
ORCID: 0000-0002-7103-5046;
e-mail: _b_@mail.ru

AUTHORS' INFO

***Anna A. Voznesenskaya**, Assistant;
address: 87 Gorky st, Vladimir, 600000, Russia;
ORCID: 0000-0002-8739-5230; eLibrary SPIN: 6796-3190;
e-mail: 2obk@bk.ru

Ruslan V. Chkalov, Junior Researcher;
eLibrary SPIN: 6129-1620; ORCID: 0000-0003-2307-0901;
e-mail: j.larenax@gmail.com

Andrey V. Kireev, Head of Laboratories;
eLibrary SPIN: 4936-2326;
e-mail: ariant-tp@mail.ru

Artem S. Raznoschikov, Assistant;
eLibrary SPIN: 5834-7047;
e-mail: raznoschikoff.ar@yandex.ru

Dmitriy A. Kochuev, Lead engineer,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics);
eLibrary SPIN: 3652-9748; ORCID: 0000-0002-7103-5046;
e-mail: _b_@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 538.975

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_107

Оригинальное исследование

Исследование структуры, фазового состава и механических свойств аддитивно выращенного композита на основе Ti-6Al-4V/V₄C с использованием синхротронного излучения

И.С. Герцель^{1,2}, К.Э. Купер³¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия³ Институт катализа имени Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Создание металлокерамических материалов представляет собой комплексную задачу, где управление структурно-фазовым составом играет ключевую роль в достижении требуемых физико-механических свойств. В работе изучается влияние температуры предварительного нагрева подложки на структурно-фазовый состав и микротвердость титаноматричных композитов, полученных методом прямого лазерного выращивания. Основной проблемой создания металлокерамических композитов является горячее растрескивание. Применение предварительного нагрева подложки является перспективным подходом к снижению термических напряжений и минимизации дефектов, таких как трещины и поры. Разработка технологий формирования бездефектных металлокерамических композитов имеет особую значимость для авиационной и аэрокосмической отрасли.

Цель — экспериментально исследовать влияние модуля предварительного нагрева подложки на фазовый состав, микроструктуру и микротвердость металлокерамического композита Ti-6Al-4V/V₄C, полученного методом прямого лазерного выращивания. На основе комплексного анализа продемонстрировать технологическую эффективность применения подогрева подложки для формирования металлокерамических покрытий без трещин и пор.

Материалы и методы. Для создания композитных материалов используется метод прямого лазерного выращивания с применением модуля предварительного нагрева подложки. Для комплексного изучения данного явления используется синхротронное излучение наряду с традиционными методами диагностики микроструктуры.

Результаты. Сравнительный анализ микроструктуры, фазового анализа и распределения микротвердости не выявил существенных изменений при использовании предварительного нагрева подложки.

Выводы. Экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что предварительный подогрев подложки может быть использован как модификация метода прямого лазерного выращивания. Использование предварительного нагрева открывает возможность получения бездефектных композитов в широком диапазоне режимов лазерного воздействия.

Ключевые слова: титаноматричные композиты (ТМК); прямое лазерное выращивание; синхротронная рентгеновская дифракция; рентгенофазовый анализ (РФА); микротвердость; микроструктура.

Как цитировать

Герцель И.С., Купер К.Э. Исследование структуры, фазового состава и механических свойств аддитивно выращенного композита на основе Ti-6Al-4V/V₄C с использованием синхротронного излучения // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 107–114. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_107

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_107

Original study article

Study of the structure, phase composition, and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V/B₄C composite using synchrotron X-ray

Ilya S. Gertsel^{1, 2}, Konstantin E. Kuper³¹ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia³ Borekov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The development of metal-ceramic materials is a complex task, where phase structure control is key to achieving the required physical and mechanical properties. The study investigates the effects of substrate pre-heating temperature on the structural-phase composition and microhardness of titanium matrix composites manufactured by direct laser deposition. The main issue in the manufacturing of metal-ceramic composites is hot cracking. Substrate preheating is a promising approach to reduce thermal stresses and minimize defects such as cracks and pores. The development of defect-free metal-ceramic composite manufacturing processes is of particular importance for the aircraft and aerospace industries.

AIM: To experimentally investigate the effect of the substrate preheating module on the phase composition, microstructure and microhardness of Ti-6Al-4V/B₄C metal-ceramic composite manufactured by direct laser deposition. Based on a comprehensive analysis, to show that substrate heating may be effectively used to make metal-ceramic coatings free of cracks and pores.

MATERIALS AND METHODS: To manufacture composite materials, the direct laser deposition method is used with a substrate preheating module. To fully investigate this phenomenon, synchrotron X-ray is used along with conventional microstructure diagnostic techniques.

RESULTS: Comparative analysis of the microstructure, phase analysis and microhardness distribution did not reveal any significant changes during substrate pre-heating.

CONCLUSIONS: Experimental data allows to conclude that substrate pre-heating can be used as a version of the direct laser deposition method. Pre-heating contributes to manufacturing defect-free composites in a wide range of laser exposure modes.

Keywords: titanium matrix composites (TMC); direct laser deposition; synchrotron X-ray diffraction; XRD phase analysis (XRD); microhardness; misrostructure.

To cite this article

Gertsel IS, Kuper KE. Study of the structure, phase composition, and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V/B₄C composite using synchrotron X-ray. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):107–114. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_107

Received: 03.02.2025

Accepted: 13.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день металлические сплавы исчерпывают свой ресурс повышения физико-механических свойств классическими методами, применяемыми в металлургии. В индустрии существует актуальная задача разработки новых материалов и соответствующих изделий на основе металлокерамики, имеющих значительно увеличенные физико-механические характеристики по сравнению с металлическими сплавами.

Титановый сплав Ti-64 является традиционным материалом, широко используемым в аэрокосмической и судостроительной промышленности [1]. Однако Ti-64 обладает высокой чувствительностью к износу.

Наплавка металлокерамических композитов в настоящее время сопряжена с рядом проблем. Одна из них — склонность к дефектообразованию: композиты подвержены развитию таких дефектов, как трещины, поры и участки несплавления [2–4]. Другая — неконтролируемые реакции *in situ*, которые могут вызвать дальнейшие микроструктурные изменения даже после процесса наплавки [5–7].

Несмотря на достижения в области аддитивного производства, наплавка высокоэнтропийных сплавов и металлокерамических смесей по-прежнему сопряжена с трудностями. Подверженность этих материалов горячему растрескиванию подробно описана в литературе [8, 9].

Реакции в системе Ti-B-C приводят к образованию новых фаз, а подача дополнительной энергии в систему «подложка/покрытие» может привести к значительным изменениям. Помимо получения покрытий без трещин за счет снижения температурных градиентов в материале, предварительный нагрев также может влиять на структурно-фазовый состав покрытий, сказываясь на их твердости и износостойкости [10]. Таким образом, этот аспект все еще требует дальнейшего обсуждения, при этом ключевым методом для такого исследования является

синхротронная рентгеновская дифракция. Несмотря на ограниченную доступность и сложность эксплуатации и интерпретации данных, расширенные возможности синхротронного излучения (СИ) необходимы для точного определения фазового состава и наблюдения реакций в процессе лазерного наплавления, что дает возможность получить информацию, недостижимую при использовании лабораторных источников [11]. Этот подход позволяет сформировать представление о микроскопических и структурных изменениях, вызванных изменением температуры предварительного нагрева подложки.

Цель данного исследования — изучить структурные изменения, происходящие в зависимости от температуры подложки, и продемонстрировать применимость модуля предварительного нагрева подложки для метода прямого лазерного выращивания.

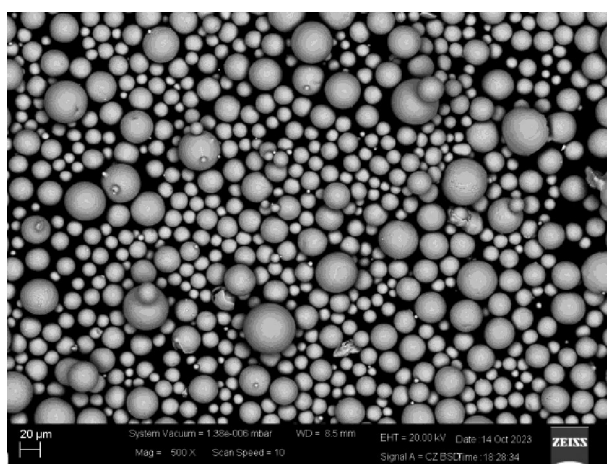
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе используется порошок сплава ВТ-6 марки НОРМИН (фракция 40–80 мкм). Была приготовлена порошковая смесь ВТ-6 с керамическими частицами V_4C_3 (фракция 40–100 мкм) в массовом соотношении 9:1, с помощью V-образного смесителя, время смешивания 1 час. Нанесение порошковой смеси осуществлялось на титановую подложку из сплава ВТ-6 размером 50×50×5 мм.

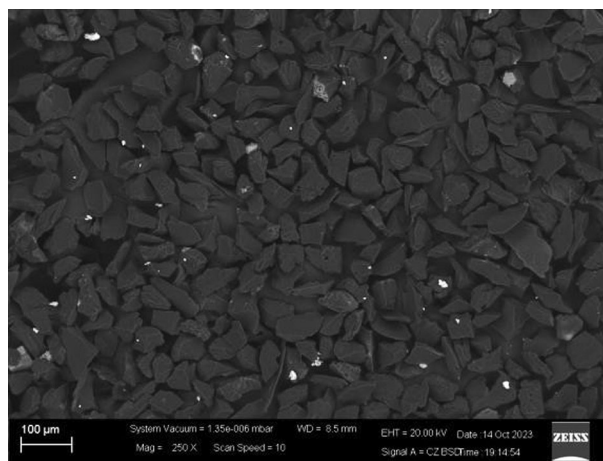
Анализ микроструктуры и элементного состава проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO MA 15 (Германия). Изображения порошковой смеси, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), показаны на рис. 1.

Результаты элементного анализа компонентов порошковой смеси приведены в табл. 1.

Метод прямого лазерного выращивания осуществлялся с использованием иттербиевого волоконного лазера IPG Photonics Co. мощностью до 3 кВт и длиной волны 1,07 мкм. Лазерный комплекс был интегрирован



a



b

Рис. 1. Изображения компонентов порошковой смеси, полученные на электронном микроскопе: *a* — сферический порошок ВТ-6; *b* — керамические частицы V_4C_3 .

Fig. 1. Electron microscope images of powder mixture components: *a*, spherical powder ВТ-6; *b*, ceramic particles V_4C_3 .

Таблица 1. Химический состав компонентов порошковой смеси

Table 1. Chemical composition of powder mixture components

VT-6	Ti	Al	V	Other
Весовой %	87,91	6,73	3,23	0,14
Атомный %	79,23	10,77	2,74	0,11
V ₄ C	B	C	Other	
Весовой %	83,37	15,94	0,7	
Атомный %	85,03	14,63	0,34	

с 6-осевым манипулятором Fanuc 710i (Япония). В качестве транспортирующей и защитной среды использовался инертный газ аргон. В ходе эксперимента по лазерной наплавке был использован модуль предварительного нагрева подложки, разработанного в ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН (диапазон рабочих температур 40–770 °С). В силу проведенной ранее серии экспериментов [10], для предотвращения горячего растрескивания, температура подложки установлена на значении 500 °С. В ходе эксперимента использовался единый энергетический режим, при котором мощность лазерного излучения $P = 500$ Вт, скорость сканирования $V = 12$ мм/с, диаметр пятна $d = 2,7$ мм, а массовый расход $C = 12$ г/с. На рис. 2 показана фотография экспериментальной установки и схема метода.

Микротвердость была измерена с помощью микротвердомера Wilson Hardness Tukon 1102 (США). Измерения проводились по высоте покрытия методом Виккерса с нагрузкой $P = 300$ г и временем выдержки $t = 3$ с. Каждая точка данных представляет собой среднее значение трех тестов на одной высоте. Нулевое значение высоты соответствует границе раздела подложка/покрытие, в то время как отрицательные значения высоты соответствуют измерениям на подложке.

Фазовый состав исследовали методом дифракции рентгеновских лучей с использованием синхротронного излучения на экспериментальной станции «Дифрактометрия в жестком рентгеновском диапазоне» 4-го канала накопительного кольца ВЭПП-3 в центре коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (СЦСТИ) на базе уникальной исследовательской установки (УРФ) «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук [12, 13].

Измерения проводились для образцов толщиной 1 мм, которые были вырезаны из поперечного сечения покрытия после эксперимента с лазерной наплавкой. Дифракционный эксперимент проводился в геометрии Дебая–Шеррера с использованием детекторной системы Mar345 (MarResearch, Германия) на синхротронной длине волны $0,3685 \pm 0,0006$ Å при диаметре пучка 300 мкм и расстоянии от образца до детектора 246,1 мм. Время накопления дифракционной картины составило 10 минут. Двумерные рентгенограммы были получены с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом Area Diffraction Machine. Идентификация фаз проводилась путем сравнения отражений на полученных 1D-рентгенограммах с их теоретическими положениями,

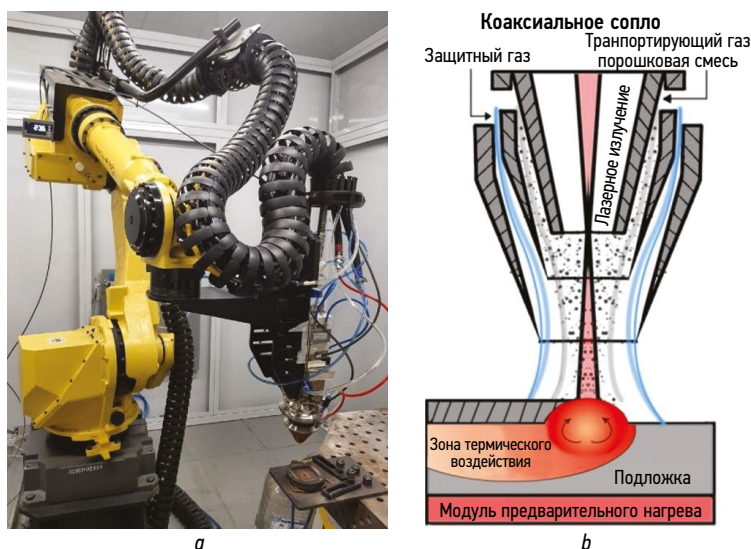


Рис. 2. Оборудование и принцип метода прямого лазерного выращивания: *a* — комплекс для лазерной наплавки; *b* — схема метода.

Fig. 2. Direct laser deposition equipment and principle: *a*, laser deposition unit; *b*, method diagram.

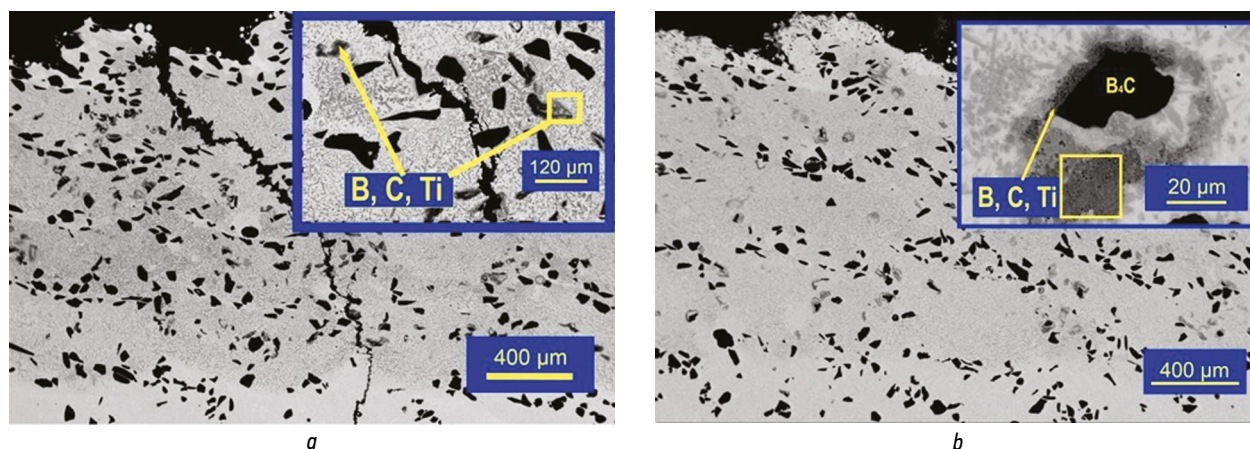


Рис. 3. СЭМ-изображения макро- и микроструктуры покрытий: *a* — полученные без нагрева подложки; *b* — полученные с нагревом подложки до 500 °С.

Fig. 3. Electron microscope images of macro- and microstructure of coatings: *a*, manufactured without substrate heating; *b*, manufactured with substrate heating to 500 °C.

которые были определены на основе структурных данных в базе данных материалов Springer [14, 15].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Микроструктурные исследования

В ходе эксперимента по лазерной наплавке были получены покрытия в соотношениях 9:1 высотой до 3 мм. Исследование микроструктуры проводилось с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Изображения полученных покрытий представлены на рис. 3.

В подтверждение теоретического прогноза композиты с использованием предварительного нагрева были получены без дефектов, о чем свидетельствуют изображения макроструктуры.

СЭМ-изображения при большем увеличении демонстрируют сходную микроструктуру с предварительным нагревом и без него (см. рис. 3, *a* и *b* соответственно). Частицы карбида бора в обоих случаях подвергаются

растворению, как показано желтыми квадратами. Матрица также имеет аналогичную структуру, содержащую игольчатые и равноосные частицы.

Дифракционные исследования

Исследование было сосредоточено на изучении влияния предварительного нагрева подложки на структуру аддитивно выращенных покрытий Ti64/V4C. Представлены диаграммы 2θ для образца с одинаковыми энергетическими параметрами при различной температуре подложки.

Интенсивность пиков α-Ti высока по сравнению с β-Ti на всех дифракционных картинах (рис. 4), что соответствует заявленному составу сплава. Дифрактограмма показывает, что пики TiB₂ имеют низкую интенсивность и уширение, что может свидетельствовать о низкой концентрации частиц в объеме, а также об относительно небольшом размере частиц. Более того, интенсивность пиков, соответствующих вторичным фазам TiB, TiC, TiB₂, по-видимому, аналогична на рис. 4, *a* и *b*.

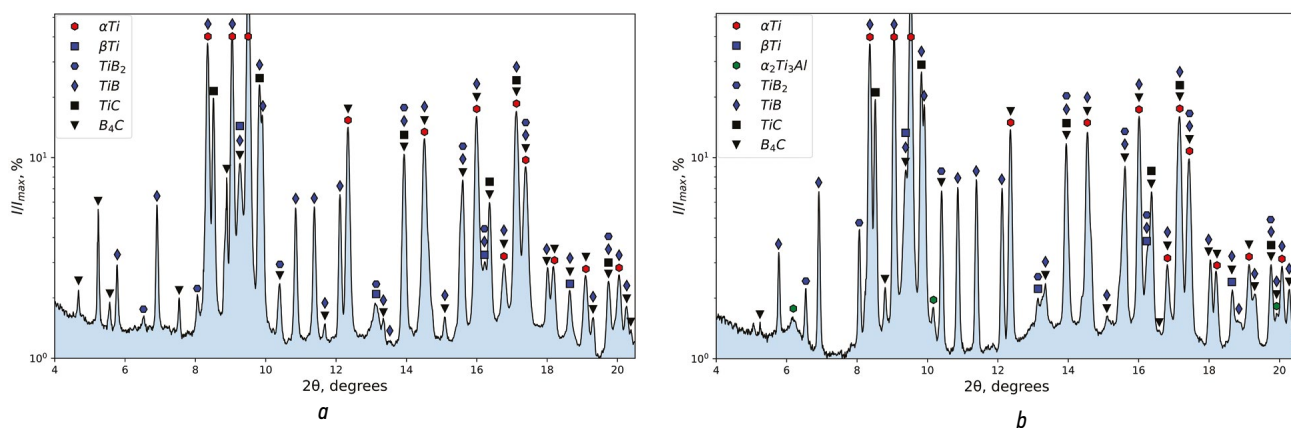


Рис. 4. Дифракционные картины образцов, полученных при температуре подложки: *a* — 23°C; *b* — 500°C.

Fig. 4. Diffraction images of samples obtained with substrate temperature: *a*, 23°C; *b*, 500°C.

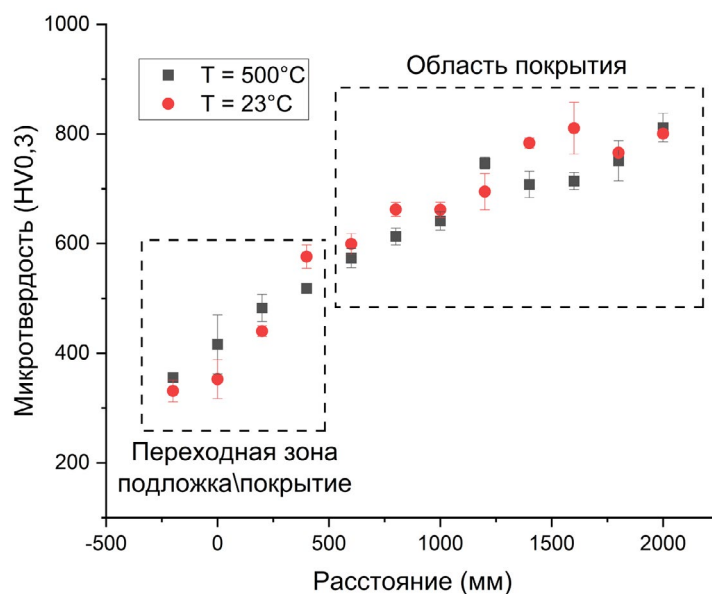


Рис. 5. Распределение микротвердости по высоте покрытия.
Fig. 5. Microhardness distribution by coating thickness.

Таким образом, очевидно, что дифракционные картины для сравниваемых образцов схожи. Этот факт важен, поскольку если нагрев подложки существенно изменит структуру композита, то этот метод вряд ли будет применим в процессе лазерного наплавления.

Микротвердость покрытий

Микротвердость — это характеристика материалов, которая четко отражает наличие различных примесей в металлической матрице. Поскольку вторичные фазы, выявленные в ходе исследования, обладают повышенной микротвердостью по сравнению со сплавом Ti-64 (349 HV [16]), полученная металлическая матрица будет становиться более твердой в зависимости от концентрации вторичных фаз. На рис. 5 представлены данные микротвердости по высоте полученных покрытий.

Распределения микротвердости по высоте не изменяются в зависимости от температуры предварительного нагрева подложки. Высокая концентрация вторичных фаз способствует повышению микротвердости металлической матрицы. Это согласуется с данными рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью сканирующей электронной микроскопии было установлено, что микроструктура остается неизменной независимо от наличия или отсутствия предварительного нагрева.

Рентгеновская дифракция синхротронного излучения позволила получить дифракционные картины и данные о фазовом составе композитов. Общие дифракционные картины для образцов с предварительным нагревом подложки и без него были в значительной степени схожими.

Предварительный нагрев подложки оказывает незначительное влияние на микротвердость матрицы, что означает, что повышение температуры подложки не оказывает существенного влияния на интенсивность образования вторичной фазы.

В целом предварительный нагрев подложки оказал незначительное влияние на структуру металлокерамического композита, но позволил получить бездефектные покрытия, продемонстрировав эффективность этого метода для снижения внутренних напряжений. Полученные экспериментальные данные подтверждают применимость предварительного нагрева для лазерной наплавки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: И.С. Герцель — концепция и методология исследования, сбор данных, анализ и интерпретация данных, написание, редактирование и утверждение окончательной версии статьи; К.Э. Купер — подготовка эксперимента по дифракции синхротронного излучения, сбор данных, редактирование и утверждение окончательной версии статьи.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 124021500015-1) ИТПМ СО РАН.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation

of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: I.S. Gertsel, conceptualization and methodology, data collection, data analysis and interpretation, writing, editing, and final approval of the manuscript; K.E. Kuper, preparation of the synchrotron diffraction experiment, data collection, editing and final approval of the manuscript.

Funding source. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 124021500015-1) of the ITAM SB RAS.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu S., Shin Y.C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review // *Mater Des.* 2019. Vol. 164. ID 107552. doi: 10.1016/j.matdes.2018.107552
2. Collin M., Rowcliffe D. The morphology of thermal cracks in brittle materials // *J Eur Ceram Soc.* 2002. Vol. 22, N 4. P. 435–445. doi: 10.1016/S0955-2219(01)00319-3
3. Sadhu A., Choudhary A., Sarkar S., et al. A study on the influence of substrate pre-heating on mitigation of cracks in direct metal laser deposition of NiCrSiBC – 60 % WC ceramic coating on Inconel 718 // *Surf Coat Technol.* 2020. Vol. 389. ID 125646. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125646
4. Fu F., Zhang Y., Chang G., Dai J. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors // *Optik.* 2016. Vol. 127, N 1. P. 200–202. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.043
5. Kumar Yadav Nartu M.S.K., Mantri S.A., Pantawane M.V., et al. In situ reactions during direct laser deposition of Ti-B4C composites // *Scr Mater Acta Materialia.* 2020. Vol. 183. P. 28–32. doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.021
6. Jia L., Wang X., Chen B., et al. Microstructural evolution and competitive reaction behavior of Ti-B4C system under solid-state sintering // *J Alloys Compd.* 2016. Vol. 687. P. 1004–1011. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.06.280
7. Bai L.L., Li J., Chen J.L., et al. Effect of the content of B4C on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings fabricated on Ti6Al4V // *Opt Laser Technol.* 2016. Vol. 76. P. 33–45. doi: 10.1016/j.optlastec.2015.07.010
8. Zhou S., Zeng X., Hu Q., Huang Y. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization // *Appl Surf Sci.* 2008. Vol. 255, N 5–1. P. 1646–1653. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.04.003
9. Kou S. Predicting susceptibility to solidification cracking and liquation cracking by calphad // *Metals (Basel).* 2021. Vol. 11, N 9. ID 1442. doi: 10.3390/met11091442
10. Gertsel I.S., Fomin V.M., Gulov M.A., et al. Effect of substrate preheating on the cermet coating structure obtained using additive technologies // *J Appl Mech Techn Phys.* 2023. Vol. 64, N 6. P. 959–963. doi: 10.1134/S0021894423060032
11. Pegues J.W., Melia M.A., Rodriguez M.A., et al. In situ synchrotron X-ray imaging and mechanical properties characterization of additively manufactured high-entropy alloy composites // *J Alloys Compd.* 2021. Vol. 876. ID 159505. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.159505
12. Ancharov A., Manakov A., Mezentsev N., et al. New station at the 4th beamline of the VEPP-3 storage ring // *Nucl Instrum Methods Phys Res A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment.* 2001. Vol. 470, N 1–2. P. 80–83. doi: 10.1016/S0168-9002(01)01029-4
13. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., et al. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // *Physics Procedia.* 2016. Vol. 84. P. 19–26. doi: 10.1016/j.phpro.2016.11.005
14. Tretyachenko L. Aluminium – molybdenum – titanium. В кн.: Al-Ti-V ternary phase diagram evaluation / G. Effenberg, editor. MSI materials science international services GmbH, 2014. doi: 10.7121/msi-eureka-10.17143.2.3
15. Rogl P., Bittermann H., Duschaneck H. Boron – carbon – titanium. В кн.: B-C-Ti ternary phase diagram evaluation / G. Effenberg, editor. MSI materials science international services GmbH; 2004. doi: 10.7121/msi-eureka-10.11050.3.3
16. Materials properties handbook: Titanium alloys / R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings, editors. ASM International, 1994. 1176 p.

REFERENCES

1. Liu S, Shin YC. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Mater Des.* 2019;164:107552. doi: 10.1016/j.matdes.2018.107552
2. Collin M, Rowcliffe D. The morphology of thermal cracks in brittle materials. *J Eur Ceram Soc.* 2002;22(4):435–445. doi: 10.1016/S0955-2219(01)00319-3
3. Sadhu A, Choudhary A, Sarkar S, et al. A study on the influence of substrate pre-heating on mitigation of cracks in direct metal laser deposition of NiCrSiBC — 60 % WC ceramic coating on Inconel 718. *Surf Coat Technol.* 2020;389:125646. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125646
4. Fu F, Zhang Y, Chang G, Dai J. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors. *Optik.* 2016;127(1):200–202. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.043
5. Kumar Yadav Nartu MSK, Mantri SA, Pantawane MV, et al. In situ reactions during direct laser deposition of Ti-B4C composites. *Scr Mater Acta Materialia.* 2020;183:28–32. doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.021
6. Jia L, Wang X, Chen B, et al. Microstructural evolution and competitive reaction behavior of Ti-B4C system under solid-state sintering. *J Alloys Compd.* 2016;687:1004–1011. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.06.280
7. Bai LL, Li J, Chen JL, et al. Effect of the content of B4C on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings fabricated on Ti6Al4V. *Opt Laser Technol.* 2016;76:33–45. doi: 10.1016/j.optlastec.2015.07.010
8. Zhou S, Zeng X, Hu Q, Huang Y. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization. *Appl Surf Sci.* 2008;255(5-1):1646–1653. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.04.003
9. Kou S. Predicting susceptibility to solidification cracking and liquation cracking by calphad. *Metals (Basel).* 2021;11(9):1442. doi: 10.3390/met11091442

10. Gertsel IS, Fomin VM, Gulov MA, et al. Effect of substrate preheating on the cermet coating structure obtained using additive technologies. *J Appl Mech Techn Phys.* 2023;64(6):959–963. doi: 10.1134/S0021894423060032

11. Pegues JW, Melia MA, Rodriguez MA, et al. In situ synchrotron X-ray imaging and mechanical properties characterization of additively manufactured high-entropy alloy composites. *J Alloys Compd.* 2021;876:159505. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.159505

12. Ancharov A, Manakov A, Mezentsev N, et al. New station at the 4th beamline of the VEPP-3 storage ring. *Nucl Instrum Methods Phys Res A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment.* 2001;470(1-2):80–83. doi: 10.1016/S0168-9002(01)01029-4

13. Piminov PA, Baranov GN, Bogomyagkov AV, et al. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4. *Physics Procedia.* 2016;84:19–26. doi: 10.1016/j.phpro.2016.11.005

14. Tretyachenko L. Aluminium–molybdenum–titanium. In: Effenberg G, editor. *Al-Ti-V ternary phase diagram evaluation.* MSI materials science international services GmbH; 2014. doi: 10.7121/msi-eureka-10.17143.2.3

15. Rogl P, Bittermann H, Duschaneck H. Boron – carbon – titanium. In: Effenberg G, editor. *B-C-Ti ternary phase diagram.* MSI materials science international services GmbH; 2004. doi: 10.7121/msi-eureka-10.11050.3.3

16. Boyer R, Welsch G, Collings EW, editors. *Materials properties handbook: Titanium alloys.* ASM International; 1994. 1176 p.

ОБ АВТОРАХ

***Илья Сергеевич Герцель**, инженер-исследователь;
адрес: Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1;
eLibrary SPIN: 8745-5844; ORCID: 0009-0007-6617-6761;
e-mail: i.gertsel@g.nsu.ru

Константин Эдуардович Купер, канд. физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник; eLibrary SPIN: 6006-8498;
ORCID: 0000-0001-5017-6248;
e-mail: K.E.Kuper@inp.nsk.su

AUTHORS' INFO

***Ilya S. Gertsel**, research engineer;
address: 4/1 Institutskaya st, Novosibirsk, 630090, Russia;
eLibrary SPIN: 8745-5844; ORCID: 0009-0007-6617-6761;
e-mail: i.gertsel@g.nsu.ru

Konstantin E. Kuper, Cand. Sci. (Physics and Mathematics),
senior research associate; eLibrary SPIN: 6006-8498;
ORCID: 0000-0001-5017-6248;
e-mail: K.E.Kuper@inp.nsk.su

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 621.791.92

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_115

Оригинальное исследование

Диффузионно-кинетическая модель образования и роста интерметаллидной фазы в трехкомпонентных твердых растворах на базе никеля с учетом температурной зависимости коэффициента диффузии

Е.К. Коваленко, Е.А. Валдайцева, Г.А. Туричин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Никелевые сплавы применяются в различных отраслях благодаря привлекательным механическим свойствам. Никелевые сплавы также активно используются в аддитивном производстве для получения сложнопрофильных изделий. Метод прямого лазерного выращивания сопряжен с высокими скоростями нагрева и охлаждения, на которые можно влиять с помощью параметров выращивания, таких как мощность лазерного излучения и скорость выращивания.

Цель — получение диффузионно-кинетической модели для расчета размера интерметаллидной фазы при различных режимах прямого лазерного выращивания в никелевых сплавах.

Материалы и методы. Рассмотрена модель для расчета размера интерметаллидной фазы в никелевом трехкомпонентном сплаве при условии химической реакции только легирующих элементов друг с другом.

Результаты. Расчет размера интерметаллидной фазы позволит прогнозировать механические свойства изделий при прямом лазерном выращивании до фактического получения изделий. Следующим шагом является валидация данной диффузионно-кинетической модели при условии химической реакции только легирующих элементов друг с другом.

Выводы. В работе представлена модель для расчета размера интерметаллидной фазы из легирующих элементов в трехкомпонентном никелевом сплаве. Модель поможет в прогнозировании размеров интерметаллидов и, следовательно, в прогнозировании механических свойств изделий.

Ключевые слова: диффузионно-кинетическая модель; трехкомпонентные никелевые сплавы; расчет размера включений; прямое лазерное выращивание; аддитивные технологии.

Как цитировать

Коваленко Е.К., Валдайцева Е.А., Туричин Г.А. Диффузионно-кинетическая модель образования и роста интерметаллидной фазы в трехкомпонентных твердых растворах на базе никеля с учетом температурной зависимости коэффициента диффузии // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 115–122. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_115

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_115

Original study article

Diffusion-kinetic model of intermetallidic phase development and growth in three-component Ni-based solid solutions based on diffusion coefficient temperature dependence

Ekaterina K. Kovalenko, Ekaterina A. Valdaytseva, Gleb A. Turichin

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Nickel alloys are used in various industries due to their attractive mechanical properties. Nickel alloys are also widely used in additive manufacturing to make complex-shaped products. The direct laser deposition method implies high heating and cooling rates, which can be influenced by manufacturing parameters such as laser power and manufacture speed.

AIM: A diffusion-kinetic model will allow to make calculations of the size of the intermetallidic phase in various direct laser deposition modes in Ni alloys.

MATERIALS AND METHODS: This article describes a model for calculating the sizes of the intermetallidic phase in a three-component Ni alloy in a chemical reaction between the alloying elements only.

RESULTS: Calculation of the size of the intermetallidic phase will allow to forecast the mechanical properties of products manufactured by direct laser deposition before the actual manufacture. A next step is to validate this diffusion-kinetic model subject to the chemical reaction between the alloying elements only.

CONCLUSIONS: The paper presents a model used to calculate the size of intermetallic phase made of alloying elements in a three-component nickel alloy. The model will help to predict the size of intermetallic compounds and, thus, the mechanical properties of products.

Keywords: diffusion-kinetic model; three-component Ni alloys; calculation of inclusions size; direct laser deposit; additive manufacturing techniques.

To cite this article

Kovalenko EK, Valdaytseva EA, Turichin GA. Diffusion-kinetic model of intermetallidic phase development and growth in three-component Ni-based solid solutions based on diffusion coefficient temperature dependence. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):115–122.

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_115

Received: 05.02.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Жаропрочные сплавы на основе никеля находят широкое применение в аэрокосмической, энергетической, морской и автомобильной промышленности [1–3] благодаря своим технологическим и механическим свойствам, таким как высокие твердость, жаропрочность, усталостная прочность, вязкость разрушения, ударная вязкость, коррозионная стойкость, обеспечиваемым упрочняющими γ'/γ'' фазами.

Никелевые сплавы активно используются в аддитивном производстве для получения сложнопрофильных изделий в более короткие сроки по сравнению с традиционными методами производства. Применение аддитивных технологий позволяет изготавливать детали с механическими свойствами, аналогичными или даже лучшими, чем у деталей, полученных стандартными металлургическими методами. При этом особое внимание следует уделять сочетанию используемых параметров аддитивного производства. Метод прямого лазерного выращивания (ПЛВ) позволяет отказаться от дорогостоящих и трудозатратных операций последующей обработки, таких как горячая изостатическая обработка, термообработка, финишная обработка поверхности и т.д.

Метод ПЛВ сопряжен с высокими скоростями нагрева и охлаждения, что влияет на микроструктуру изделий в виде температурного поля. В свою очередь, на температурное поле оказывают влияние параметры выращивания, среди которых мощность лазерного излучения и скорость выращивания. В многокомпонентных сплавах, к которым относятся жаропрочные сплавы на основе никеля, при кристаллизации, как правило, образуются интерметаллиды, и их размер влияет на механические свойства изделия. Получение диффузионно-кинетической модели позволит производить расчеты размера интерметаллидных фаз при различных режимах прямого лазерного выращивания в никелевых сплавах [4–6].

В работе [5] рассматривали модель для определения размера интерметаллидной фазы Ni_3Al в никелевом сплаве. Расчет температурного поля позволил получить график роста интерметаллидной фазы Ni_3Al в зависимости от времени для заданной температуры термического цикла. Полученная модель дает возможность прогнозировать размер интерметаллических включений, а следовательно, и свойства получаемых изделий. В работе [6] была получена математическая модель роста интерметаллидной фазы при прямом лазерном выращивании для прогнозирования параметров фазы упрочнения, которая позволяет с достаточной точностью определять размер Ni_3Al . Сравнение расчетных и экспериментальных значений размера интерметаллидной фазы в работе показало, что предложенная модель дает удовлетворительные результаты при ограниченном диапазоне скоростей охлаждения. Авторы предположили, что это связано с ростом зерен за счет образования новой фазы и прекращается из-за

снижения концентрации компонентов, участвующих в химической реакции, в прилегающей зоне, а рост за счет поглощения соседних зерен не успевает произойти.

Расчет размера интерметаллидной фазы позволит прогнозировать механические свойства изделий при прямом лазерном выращивании до фактического получения изделий. В данной работе рассматривается модель для расчета размера интерметаллидных фаз в трехкомпонентном никелевом сплаве при условии химической реакции только легирующих элементов друг с другом и без участия основного элемента никеля. Следующим шагом является валидация данной диффузионно-кинетической модели при условии химической реакции только легирующих элементов друг с другом.

ВЫВОД УРАВНЕНИЯ

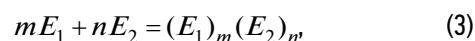
Рассмотрим трехкомпонентный сплав $E_0E_1E_2$, где E_0 — основной элемент, E_1 и E_2 — легирующие элементы. При этом выполняются условия:

$$C_0 \gg C_1^0; \quad (1)$$

$$C_0 \gg C_2^0, \quad (2)$$

где C_0^0, C_1^0, C_2^0 — начальные концентрации элементов E_0, E_1, E_2 в сплаве соответственно.

Будем считать, что элементы E_1 и E_2 взаимодействуют друг с другом и не взаимодействуют с основным матричным элементом E_0 . Тогда химическую реакцию образования интерметаллидов в общем виде можно представить как:



где m, n — соответствующие стехиометрические коэффициенты.

Для реакции мы можем записать соответствующее кинетическое уравнение химической реакции [7]:

$$\frac{dV}{dt} = K_1(T) \cdot C \cdot S - K_2(T) \cdot S, \quad (4)$$

где V — объем включения; S — площадь поверхности включения; $K_1(T)$ — константа скорости прямой реакции; $K_2(T)$ — константа скорости обратной реакции; C — поверхностная концентрация легирующих элементов, при реакции с которой возникает новая фаза, в общем случае является функцией времени и координат; T и t — локальные температура и время соответственно.

Отношение между объемом включения и площадью его поверхности зависит от формы включения. В начальный момент роста размер включения a гораздо меньше типичной толщины слоя диффузии. Поэтому включение можно трактовать как «точечный» источник (или сток) растворенного вещества, и концентрационное поле имеет сферическую симметрию. Этот факт позволяет рассматривать включение как сферическое с эффективным радиусом a . Тогда (4) можно переписать следующим образом:

$$\frac{da}{dt} = K_1(T) \cdot C - K_2(T), \quad (5)$$

где a — эффективный радиус включения.

Константы скорости реакции, в предположении о термомодуляционном характере образования и разрыва химических связей, получаем из формулы Аррениуса:

$$K_{1,2}(T) = K_{1,2}^{(0)} \cdot \exp\left(\frac{-Q_{1,2}}{kT}\right), \quad (6)$$

где Q_1, Q_2 — энергия активации прямой и обратной реакции соответственно; k — постоянная Больцмана; $K_1^{(0)}, K_2^{(0)}$ — частотный фактор перед экспонентой [8].

Как было показано в [9], скорость гетерогенной реакции определяется, с одной стороны, истинной химической кинетикой на поверхности, а с другой — скоростью транспортировки реагирующих веществ к этой поверхности, т. е. диффузией. В твердых растворах при высоких температурах скорость химического взаимодействия превышает скорость диффузии, поэтому скорость реакции на поверхности растущего включения зависит от концентрации реагирующих компонентов на этой поверхности. Для легирующего компонента поверхностная концентрация будет определяться решением уравнения диффузии для этого компонента. Поэтому скорость транспортировки легирующих элементов E_1 и E_2 будет определяться скоростью диффузии в основном элементе E_0 , а истинная химическая кинетика — легирующим элементом с наименьшей концентрацией на поверхности. Так как мы считаем, что легирующие элементы распределены в сплаве равномерно по всему объему, то можно предположить, что реакция идет во всех направлениях с равной скоростью, а значит, имеет место сферическая симметрия задачи. Оценивая диффузионное число Пекле как $Pe \ll 1$, можно пренебречь конвекционным членом, связанным с движением включений через границу. Таким образом, уравнение диффузии рассматривается в одномерной постановке в сферической системе координат, связанной с растущим включением. Тогда для компонентов E_1 и E_2 , соответственно, можем записать:

$$\frac{dC_1(r,t)}{dr} = D_1(T) \Delta C_1(r,t) = D_1(T) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_1(r,t)}{\partial r} \right); \quad (7)$$

$$\frac{dC_2(r,t)}{dr} = D_2(T) \Delta C_2(r,t) = D_2(T) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_2(r,t)}{\partial r} \right), \quad (8)$$

где D_1 и D_2 — соответствующие коэффициенты диффузии компонентов E_1 и E_2 в основном элементе E_0 , которые определяются как

$$D_{1,2}(T) = D_{1,2}^{(0)} \cdot \exp\left(\frac{-E_{a1,2}}{RT}\right), \quad (9)$$

где $D_{1,2}^{(0)}$ — предэкспоненциальные множители; $E_{a1,2}$ — энергия активации диффузии соответствующих компонентов в основном элементе; R — универсальная газовая постоянная.

Граничное условие на поверхности растущего включения будет определяться условием неразрывности потока массы через эту поверхность, т. е. для каждой реакции можем записать:

$$-D_i \frac{dC_i(r,t)}{dr} \Big|_{r=a} = K_1(T) \cdot C_j - K_2(T). \quad (10)$$

Концентрации легирующих элементов в области, где происходит транспортировка E_1 и E_2 к поверхности, можно описать следующим уравнением:

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1. \quad (11)$$

Концентрации легирующих элементов на поверхности включения можно описать следующим уравнением:

$$C_1|_{r=a} + C_2|_{r=a} = 1. \quad (12)$$

Учитывая уравнение (12), корректируем правую часть уравнения (10) с помощью коэффициента $b = 1 / (1 - C_0^0)$:

$$-D_i \frac{dC_i(r,t)}{dr} \Big|_{r=a} = K_1(T) \cdot b \cdot C_j - K_2(T). \quad (13)$$

Допустим, что $D_1 < D_2$, тогда D_1 определяет наименьшую скорость подвода из легирующих элементов E_1 . Химическая кинетика на поверхности, в свою очередь, определяется наименьшей концентрацией компонентов E_1 и E_2 , из чего имеем три варианта на поверхности включения: $C_1 < C_2$, $C_1 = C_2$ и $C_1 > C_2$. Таким образом возможны два варианта уравнения (13) при рассмотрении нашего случая реакции только компонентов E_1 и E_2 друг с другом:

$$-D_1 \frac{dC_1(r,t)}{dr} \Big|_{r=a} = K_1(T) \cdot b \cdot C_1 - K_2(T) \quad C_1 \leq C_2; \quad (14)$$

$$-D_1 \frac{dC_1(r,t)}{dr} \Big|_{r=a} = K_1(T) \cdot b \cdot C_2 - K_2(T) \quad C_1 > C_2. \quad (15)$$

На значительном расстоянии от растущих включений концентрация каждого легирующего элемента определяется средним значением C_1^0 и C_2^0 :

$$C_1(r,t) \Big|_{r \rightarrow \infty} = C_1^0; \quad (16)$$

$$C_2(r,t) \Big|_{r \rightarrow \infty} = C_2^0. \quad (17)$$

Таким образом, в противоположность широко известной формулировке этой проблемы [4], где реакция протекает в объеме, в котором имеет место диффузия, в нашем рассмотрении реакция имеет место только на границе слоя диффузии, а именно на поверхности включения, т. е. это задача реакционно-диффузионного типа.

Используем замену переменных:

$$U_{1,2}(r,t) = (C_{1,2}(r,t) - C_{1,2}^0) \cdot r, \quad (18)$$

где r — координата сферической системы координат, связанной с включением и началом в центре включения. Тогда:

$$C_{1,2}(r,t) = \frac{U_{1,2}(r,t)}{r} + C_{1,2}^0; \quad (19)$$

$$\frac{\partial C_{1,2}(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial U_{1,2}(r,t)}{\partial t}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial C_{1,2}(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial U_{1,2}(r,t)}{\partial r} - \frac{U_{1,2}(r,t)}{r^2}. \quad (21)$$

Сделав замену $r = x + a$ и выполнив соответствующие преобразования, получим системы уравнений

с граничными условиями для включения в декартовой системе координат с началом на поверхности включения:

$$\frac{\partial U_{1,2}(x,t)}{\partial t} = D_{1,2} \frac{\partial^2 U_{1,2}(x,t)}{\partial x^2}; \quad (22)$$

$$\frac{\partial U_1(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \left[\frac{1}{a} - \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right] \cdot U_1(x,t) \Big|_{x=0} - \frac{a}{D_1(T)} [K_1(T) \cdot b \cdot C_1^0 - K_2(T)] \quad C_1 \leq C_2; \quad (23)$$

$$\frac{\partial U_1(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \left[\frac{1}{a} + \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right] \cdot U_1(x,t) \Big|_{x=0} - \frac{a}{D_1(T)} [K_1(T) \cdot b \cdot (1 - C_1^0) - K_2(T)] \quad C_1 > C_2. \quad (24)$$

Мы получили систему дифференциальных уравнений в частных производных, с нелинейными граничными условиями. В сборнике [5] приведено аналитическое решение для задачи типа $u_t = k^2 u_{xx}$ $0 < x, t < +\infty$, с условиями $u(x, 0) = 0$, $u_x(0, t) - hu(0, t) = -h\varphi(t)$.

Рассмотрим наш случай при $C_1 \leq C_2$:

$$k^2 = D_1(T); \quad (25)$$

$$h = \frac{1}{a} - \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)}; \quad (26)$$

$$\varphi(t) = \frac{a}{D_1(T) \left(\frac{1}{a} - \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right)} [K_1(T) \cdot b \cdot C_1^0 - K_2(T)]. \quad (27)$$

Тогда решение уравнения для U_1 будет выглядеть следующим образом:

$$U_1(x,t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{a [K_1(T) \cdot b \cdot C_1^0 - K_2(T)]}{\sqrt{D_1(T)(t-\tau)}} \left[\exp \left\{ -\frac{x^2}{4D_1(T)(t-\tau)} \right\} - \left(\frac{1}{a} - \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \int_0^\infty \exp \left\{ -\left(\frac{1}{a} - \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \xi - \frac{(x+\xi)^2}{4D_1(T)(t-\tau)} \right\} d\xi \right] d\tau. \quad (28)$$

Коэффициенты $K_{1,2}^{(1)}$, $D_{1,2}$, зависят от времени, а значит, и от τ , опосредовано, через зависимость температуры от времени. Размер включения a зависит от времени по условию задачи. Теперь, возвращаясь обратно к выражению концентрации, для $x = 0$ (или $r = a$) получаем:

$$C_1(x,t) = C_1^0 - \frac{1}{a\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{a [K_1(T) \cdot b \cdot C_1^0 - K_2(T)]}{\sqrt{D_1(T)(t-\tau)}} \left[\exp \left\{ -\frac{x^2}{4D_1(T)(t-\tau)} \right\} - \left(\frac{1}{a} - \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \int_0^\infty \exp \left\{ -\left(\frac{1}{a} - \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \xi - \frac{\xi^2}{4D_1(T)(t-\tau)} \right\} d\xi \right] d\tau \quad (29)$$

Взяв внутренний интеграл, окончательно получаем:

$$\frac{da}{dt} = K_1(T) \cdot b \cdot C_1 - K_2(T); \quad (30)$$

$$C_1(x,t) = C_1^0 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{a(\tau) [K_1(T) \cdot b \cdot C_1^0 - K_2(T)]}{a(\tau) \sqrt{D_1(T)(t-\tau)}} \left[1 - \sqrt{\pi} We^{w^2} (1 - erf[W]) \right] d\tau, \quad (31)$$

где $W = \left(\frac{1}{a} - \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \sqrt{D_1(T)(t-\tau)}$.

Рассмотрим наш случай при $C_1 > C_2$:

$$k^2 = D_1(T); \quad (32)$$

$$h = \frac{1}{a} + \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)}; \quad (33)$$

$$\varphi(t) = \frac{a}{D_1(T) \left(\frac{1}{a} + \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right)} [K_1(T) \cdot b \cdot (1 - C_1^0) - K_2(T)]. \quad (34)$$

Тогда решение уравнения для U_1 будет выглядеть следующим образом:

$$U_1(x,t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{a [K_1(T) \cdot b \cdot (1 - C_1^0) - K_2(T)]}{\sqrt{D_1(T)(t-\tau)}} \left[\exp \left\{ -\frac{x^2}{4D_1(T)(t-\tau)} \right\} - \left(\frac{1}{a} + \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \int_0^\infty \exp \left\{ -\left(\frac{1}{a} + \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \xi - \frac{(x+\xi)^2}{4D_1(T)(t-\tau)} \right\} d\xi \right] d\tau. \quad (35)$$

Коэффициенты K_1 , K_2 , D_1 зависят от времени, а значит, и от τ , опосредовано, через зависимость температуры от времени. Размер включения a зависит от времени по условию задачи. Теперь, возвращаясь обратно к выражению концентрации, для $x = 0$ (или $r = a$) получаем:

$$C_1(x,t) = C_1^0 - \frac{1}{a\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{a [K_1(T) \cdot b \cdot (1 - C_1^0) - K_2(T)]}{\sqrt{D_1(T)(t-\tau)}} \left[\exp \left\{ -\frac{x^2}{4D_1(T)(t-\tau)} \right\} - \left(\frac{1}{a} + \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \int_0^\infty \exp \left\{ -\left(\frac{1}{a} + \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \xi - \frac{\xi^2}{4D_1(T)(t-\tau)} \right\} d\xi \right] d\tau. \quad (36)$$

Взяв внутренний интеграл, окончательно получаем:

$$\frac{da}{dt} = K_1(T) \cdot b \cdot (1 - C_1) - K_2(T); \quad (37)$$

$$C_1(x,t) = C_1^0 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{a(\tau) [K_1(T) \cdot b \cdot (1 - C_1^0) - K_2(T)]}{a(t) \sqrt{D_1(T)(t-\tau)}} \left[1 - \sqrt{\pi} W e^{W^2} (1 - \operatorname{erf}[W]) \right] d\tau, \quad (38)$$

$$\text{где } W = \left(\frac{1}{a} + \frac{K_1(T) \cdot b}{D_1(T)} \right) \sqrt{D_1(T)(t-\tau)}.$$

Уравнения (30) с граничными условиями (31) при $C_1 > C_2$ и (37) с граничными условиями (38) при $C_1 \leq C_2$ образуют системы уравнений, решения которых дают изменения концентраций легирующих элементов в твердом растворе трехкомпонентного сплава и размера соответствующих включений, образованных этими легирующими элементами в результате химических реакций друг с другом.

В массе материала в процессе изменения температуры, т.е. при охлаждении, зародыши новой фазы будут образовываться во всем объеме материала. Пока концентрация легирующих элементов и относительный объем включений малы, вероятность столкновения растущих включений тоже мала. Но на конечной стадии роста взаимное влияние растущих включений будет усиливаться из-за уменьшения концентраций легирующих элементов за счет поглощения их другими растущими включениями. Поэтому условия (16) и (17) изменятся и примут вид:

$$C_{1,2}(r,t) \Big|_{r \rightarrow \infty} = C_{1,2}^0 - n C'_{1,2} V, \quad (39)$$

где n — концентрация растущих включений, образованных участием компонентов E_1 и E_2 , $C'_{1,2}$ — концентрация компонентов E_1 и E_2 в включении, определяемая стехиометрическими коэффициентами.

Объемы V определяются в зависимости от формы образующегося включения. Для сферического включения

$$\frac{da}{dt} = K_1(T) \cdot b \cdot C_1 - K_2(T); \quad (42)$$

$$C_1(x,t) = C_1^0 - n \cdot C'_1 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot a^3 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{a(\tau) [K_1(T) \cdot b \cdot C_1^0 - K_2(T)]}{a(t) \sqrt{D_1(T)(t-\tau)}} \left[1 - \sqrt{\pi} W e^{W^2} (1 - \operatorname{erf}[W]) \right] d\tau; \quad (43)$$

для $C_1 > C_2$

$$\frac{da}{dt} = K_1(T) \cdot b \cdot (1 - C_1) - K_2(T); \quad (44)$$

$$C_1(x,t) = C_1^0 - n \cdot C'_2 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot a^3 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{a(\tau) [K_1(T) \cdot b \cdot (1 - C_1^0) - K_2(T)]}{a(t) \sqrt{D_1(T)(t-\tau)}} \left[1 - \sqrt{\pi} W e^{W^2} (1 - \operatorname{erf}[W]) \right] d\tau. \quad (45)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена модель для расчета размера интерметаллидной фазы из легирующих элементов в трехкомпонентном никелевом сплаве. Модель поможет в прогнозировании размеров интерметаллидов и, следовательно, в прогнозировании механических свойств изделий. В дальнейшем планируется произвести валидацию данной модели.

этот параметр равен $4/3\pi a^3$, где a — характерный размер включения.

В реальной физической системе из-за разных условий образования и роста зародышей новой фазы размеры включений будут отличаться друг от друга в некотором диапазоне значений. Однако в качестве усредненного значения параметр n можно определить, зная предельную растворимость легирующего компонента в основном элементе из диаграммы состояния бинарной системы основной элемент — легирующий элемент. Тогда равновесная концентрация запишется как:

$$C_{1,2}^0 = C_{1,2}^{\lim}(T) + V_{1,2}^{\lim} n C'_{1,2}, \quad (40)$$

где $C_{1,2}^{\lim}(T)$ — предельная растворимость легирующего элемента в основном элементе, взятая из термодинамической диаграммы, $V_{1,2}^{\lim}$ — предельный объем растущего включения.

Тогда для сферических включений для комнатной температуры параметр n можно определить как:

$$n = \frac{C_{1,2}^0 - C_{1,2}^{\lim}(293)}{\frac{4}{3} \pi (a^{\lim})^3 C'_{1,2}}. \quad (41)$$

Таким образом, возвращаясь к системам уравнений (30)–(31) и (37)–(38), можем записать: для $C_1 \leq C_2$

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: Е.К. Коваленко — сбор, анализ и обработка материала, написание статьи, редактирование статьи; Е.А. Валдайцева — сбор, анализ и обработка материала, редактирование статьи; Г.А. Туричин — сбор, анализ и обработка материала.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval

of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: E.K. Kovalenko, collection, analysis and processing of material, writing of the article, editing of the article; E.A. Valdaitseva, collection, analysis and processing of material, editing of the article; G.A. Turichin, collection, analysis and processing of material.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jinoop A.N., Paul C.P., Bindra K.S. Laser-assisted directed energy deposition of nickel super alloys: a review // *Proc Inst Mech Eng Pt L J Mater Des Appl.* 2019. Vol. 233, N 11. P. 2376–2400. doi: 10.1177/1464420719852658
2. Alves Ferreira A., Loureiro Amaral R., Correia Romio P., et al. Deposition of nickel-based superalloy claddings on low alloy structural steel by direct laser deposition // *Metals.* 2021. Vol. 11, N 8. ID 1326. doi: 10.3390/met11081326
3. Conduit B.D., Illston T., Baker S., et al. Probabilistic neural network identification of an alloy for direct laser deposition // *Mater Des.* 2019. Vol. 168. ID 107644. doi: 10.1016/j.matdes.2019.107644
4. Alves Ferreira A., Loureiro Amaral R., Correia Romio P., et al. Deposition of nickel-based superalloy claddings on low alloy structural steel by direct laser deposition // *Metals.* 2021. Vol. 11, N 8. ID 1326. doi: 10.3390/met11081326
5. Alekseev A.V., Valdaitseva E.A., Aleksandrov V.L. Modeling of the formation process of the coherent intermetallics in nickel alloys

during laser treatment // *Key Eng Mater.* 2019. Vol. 822. P. 438–444. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.822.438

6. Alekseev A.V., Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., et al. Simulation of the Ni₃Al intermetallic inclusion growth process during direct laser deposition using Ni-based superalloy powder // *Materials Today: Proceedings.* 2020. Vol. 30-3. P. 756–760. doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.562

7. Lopota V., Turichin G., Valdaitseva E., et al. Theoretical investigation and modelling of intermetallic inclusions formation in laser treatment of Al-Mg alloys // *SPIE Proc.* 2004. Vol. 5399. doi: 10.1117/12.555548

8. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т. 1. Москва: Металлургия, 1976. 695 с.

9. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: Учебник-монография. 4-е изд. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2008. 408 с.

REFERENCES

1. Jinoop AN, Paul CP, Bindra KS. Laser-assisted directed energy deposition of nickel super alloys: a review. *Proc Inst Mech Eng Pt L J Mater Des Appl.* 2019;233(11):2376–2400. doi: 10.1177/1464420719852658
2. Alves Ferreira A, Loureiro Amaral R, Correia Romio P, et al. Deposition of nickel-based superalloy claddings on low alloy structural steel by direct laser deposition. *Metals.* 2021;11(8):1326. doi: 10.3390/met11081326
3. Conduit BD, Illston T, Baker S, et al. Probabilistic neural network identification of an alloy for direct laser deposition. *Mater Des.* 2019;168:107644. doi: 10.1016/j.matdes.2019.107644
4. Alves Ferreira A, Loureiro Amaral R, Correia Romio P, et al. Deposition of nickel-based superalloy claddings on low alloy structural steel by direct laser deposition. *Metals.* 2021;11(8):1326. doi: 10.3390/met11081326
5. Alekseev AV, Valdaitseva EA, Aleksandrov VL. Modeling of the formation process of the coherent intermetallics in nickel

alloys during laser treatment. *Key Eng Mater.* 2019;822:438–444. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.822.438

6. Alekseev AV, Turichin GA, Klimova-Korsmik OG, et al. Simulation of the Ni₃Al intermetallic inclusion growth process during direct laser deposition using Ni-based superalloy powder. *Materials Today: Proceedings.* 2020;30-3:756–760. doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.562

7. Lopota V, Turichin G, Valdaitseva E, et al. Theoretical investigation and modelling of intermetallic inclusions formation in laser treatment of Al-Mg alloys. *SPIE Proc.* 2004;5399. doi: 10.1117/12.555548

8. Prokhorov NN. *Physical processes in metals at welding.* Vol. 1. Moscow: Metallurgy; 1976. 695 p. (In Russ.)

9. Frank-Kamenetsky DA. *Fundamentals of macrokinetics. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics: Textbook-monograph.* 4th ed. Dolgoprudny: Intellect Publishing House; 2008. 408 p. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

***Екатерина Константиновна Коваленко;** инженер отдела моделирования и информационных технологий; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3; ORCID: 0009-0000-5437-0056; e-mail: kovalenko.ek@inbox.ru

Екатерина Александровна Валдайцева; начальник отдела моделирования и информационных технологий; ORCID: 0000-0003-2131-9224; eLibrary SPIN: 1797-1043; e-mail: valdaitseva@mail.ru

Глеб Андреевич Туричин, д-р техн. наук, доцент, ректор; eLibrary SPIN: 5739-8224; e-mail: gleb@ltc.ru

AUTHORS' INFO

***Ekaterina K. Kovalenko;** Engineer of the Department of Modeling and Information Technology; address: 3 Lotsmanskaya st, 3, Saint Petersburg, 190121, Russia; ORCID: 0009-0000-5437-0056; e-mail: kovalenko.ek@inbox.ru

Ekaterina A. Valdaytseva; Head of the Department of Modeling and Information Technology; ORCID: 0000-0003-2131-9224; eLibrary SPIN: 1797-1043; e-mail: valdaitseva@mail.ru

Gleb A. Turichin; Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Rector; eLibrary SPIN: 5739-8224; e-mail: gleb@ltc.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 621.791.927.5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_123

Оригинальное исследование

Влияние стратегии наплавки слоя на формирование, структуру и свойства толстостенных элементов при электродуговом выращивании деталей из алюминиевого сплава ER5356

К.С. Насоновский, А.А. Воропаев, Д.В. Волосевич, Н.Д. Роцин, Р.С. Корсмик

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время алюминиевые сплавы нашли свое применение во многих отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, судостроительная, химическая, машиностроительная и пр. Внедрение технологии электродугового выращивания в производственный цикл изделий из алюминиевых сплавов позволяет значительно снизить временные и материальные издержки. Серьезной проблемой при использовании аддитивных технологий является анизотропия свойств. Как правило, в направлении наплавки слоев (вдоль оси X) свойства на растяжение выше, чем в направлении выращивания (вдоль оси Z). Одним из способов снижения уровня анизотропии является использование альтернативных стратегий выращивания. Данное исследование направлено на установление зависимости свойств материала от стратегии наплавки слоя.

Цель — исследование влияния стратегии наплавки слоя на формирование, структуру и свойства толстостенных элементов при электродуговом выращивании из алюминиевого сплава ER5356.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели были изготовлены образцы со следующими стратегиями наплавки: линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания, линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания, эллиптические колебания вдоль направления выращивания, а также змейка перпендикулярно направлению выращивания. В работе исследовались структура и механические свойства образцов, полученных электродуговым выращиванием с различной стратегией заполнения.

Результаты. С точки зрения формирования стратегии с линейными колебаниями под углом 45 градусов относительно направления выращивания (стратегия 2) и эллиптическими колебаниями вдоль направления выращивания (стратегия 3) в местах начала/завершения процесса имели нестабильности. Качество боковой поверхности у образцов 2, 3 и 4 находится на одном уровне, у образца 1 — чешуйчатость более выраженная. Минимальный уровень анизотропии равный 4 % был достигнут при использовании первой стратегии. Для трех остальных стратегии этот показатель находился в диапазоне от 10,2 до 14,2 %. Пористость образцов при всех четырех стратегиях не превышала 1 % по площади сечения. Снижение уровня механических свойств в направлении оси Z связано с наличием хрупких фаз на границах между слоями (стратегии 2 и 3) и несплавлением слоев между собой (стратегия 4).

Выводы. Полученные результаты показали, что стабильное формирование обеспечивают только стратегии с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания и со змейкой. В двух других наблюдаются нестабильные участки на края образца. При этом качество боковой поверхности близко на всех четырех образцах. Также стоит отметить, что необходимый уровень механических свойств с малой анизотропией был достигнут только при использовании стратегии с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания.

Ключевые слова: электродуговое выращивание; стратегия наплавки; алюминиевый сплав ER5356; механические испытания; металлографические исследования.

Как цитировать

Насоновский К.С., Воропаев А.А., Волосевич Д.В., Роцин Н.Д., Корсмик Р.С. Влияние стратегии наплавки слоя на формирование, структуру и свойства толстостенных элементов при электродуговом выращивании деталей из алюминиевого сплава ER5356 // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 123–132. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_123

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_123

Original study article

The effect of the layer deposition technique on production, structure, and properties of thick-walled elements during wire and arc additive manufacturing of parts from aluminum alloy ER5356

Konstantin S. Nasonovskiy, Artem A. Voropaev, Darya V. Volosevich,
Nikita D. Roschin, Rudolf S. Korsmik

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Today, aluminum alloys are applied in many industries, including aerospace, shipbuilding, chemical, mechanical engineering, etc. Wire and arc manufacturing used to produce aluminum alloy products saves much time and cost. A big problem related to additive technologies is the anisotropy of properties. Tensile properties are usually higher along the deposition path (X axis) than the manufacturing path (Z axis). One way to reduce the anisotropy is to use alternative growth strategies. This study aims to establish the dependence of material properties on the layer deposition strategy.

AIM: The article investigates the effect of the layer deposition technique on production, structure and properties of thick-walled elements during wire and arc additive manufacturing from aluminum alloy ER5356.

MATERIALS AND METHODS: For this purpose, samples were manufactured with the following deposition techniques: linear oscillations normal to the manufacturing path; linear oscillations at a 45-degree angle to the manufacturing path; elliptical oscillations along the manufacturing path, and a zigzag normal to the manufacturing path. The article explores the structure and mechanical properties of samples made by wire and arc additive manufacturing with different filling techniques.

RESULTS: For developing a strategy with linear oscillations at a 45-degree angle to the manufacturing path (Strategy 2) and elliptical oscillations along the manufacturing path (Strategy 3), there were unstable areas at the start/end points of the process. The lateral surface quality of samples 2, 3 and 4 is the same; whereas sample 1 has more pronounced ripples. The least anisotropy of 4% was achieved using the first strategy. For the other three strategies, this value varied from 10.2 to 14.2%. Porosity of the samples for all four strategies did not exceed 1% of the cross-sectional area. Deteriorated mechanical properties along the Z axis are associated with brittle phases at the layer boundaries (strategies 2 and 3) and the incomplete fusion of layers (strategy 4).

CONCLUSIONS: The results show that a stable structure is produced only by techniques with linear oscillations normal to the manufacturing path and with a zigzag motion. In the other two cases, unstable areas at the edges of the sample are observed. Moreover, the quality of the side surface is similar in all four samples. In addition, it is worth noting that a required level of mechanical properties with low anisotropy was achieved only with the strategy providing for linear oscillations normal to the manufacturing path.

Keywords: wire and arc additive manufacturing; metal adding techniques; ER5356 aluminum alloy; mechanical tests; metallographic study.

To cite this article

Nasonovskiy KS, Voropaev AA, Volosevich DV, Roschin ND, Korsmik RS. The effect of the layer deposition technique on production, structure, and properties of thick-walled elements during wire and arc additive manufacturing of parts from aluminum alloy ER5356. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):123–132. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_123

Received: 10.01.2025

Accepted: 10.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Текущие тенденции развития техники указывают на увеличение спроса на алюминий и его сплавы. Основными потребителями данной группы сплавов являются авиа- и ракетостроение, что обусловлено высокой удельной прочностью, низким весом и высокой коррозионной стойкостью алюминия. Помимо этого, за счет особенностей физических и эксплуатационных свойств алюминиевые сплавы активно используются в машиностроительной, химической, судостроительной и прочих отраслях промышленности [1–3].

Кроме традиционных технологий получения заготовок, в последнее десятилетие набирают популярность аддитивные технологии. Одной из таких технологий является электродуговое выращивание. В данной технологии в качестве источника энергии для плавления присадочного материала используется электрическая дуга. При этом материал в зону обработки поступает в виде проволоки. За счет этого обеспечиваются высокие коэффициенты использования материала и производительность. Так, например, в рамках исследования [4] представлены результаты применения различных методов WAAM для производства компонентов авиакосмической отрасли. Показано существенное снижение временных затрат на производство некоторых деталей, а также существенная экономия материала, что приводит к уменьшению себестоимости изделий.

К недостаткам данной технологии можно отнести низкое качество поверхности, а также анизотропию механических свойств. Для решения данных проблем можно прибегнуть к использованию различных стратегий заполнения слоя. В настоящее время количество статей от авторских коллективов из разных стран, направленных на изучение влияния стратегии заполнения на формирование, структуру и свойства, значительно растет,

что указывает на актуальность данного направления исследований. В частности, разносторонний обзор данного вопроса представлен в статье [5]. Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что использование различных стратегий наплавки слоя может приводить к улучшению механических свойств [6, 7], снижению количества дефектов [8–10], повышению стабильности процесса [11, 12] и точности изготавливаемых деталей [13, 14].

Данное исследование направлено на получение практических результатов, свидетельствующих о влиянии стратегии наплавки на структуру и свойства при электродуговом выращивании.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методика, оборудование и материалы

Методика проведения эксперимента

В рамках исследования были рассмотрены четыре стратегии наплавки слоя: линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания, линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания, эллиптические колебания вдоль направления выращивания, а также змейка. Схемы представлены на рис. 1.

Сварочный ток во всех четырех случаях был взят равным 90 А. При этом первые четыре слоя были выполнены на сварочном токе 120 А. Это необходимо для прогрева подложки до рабочих температур и обеспечения полного сплавления присадочного материала с материалом подложки. Данные слои в дальнейшем были отрезаны и не использовались при механических и металлографических исследованиях.

Стратегии с линейными и эллиптическими колебаниями были реализованы с помощью встроенных функций сварочного робота-манипулятора. В данном случае

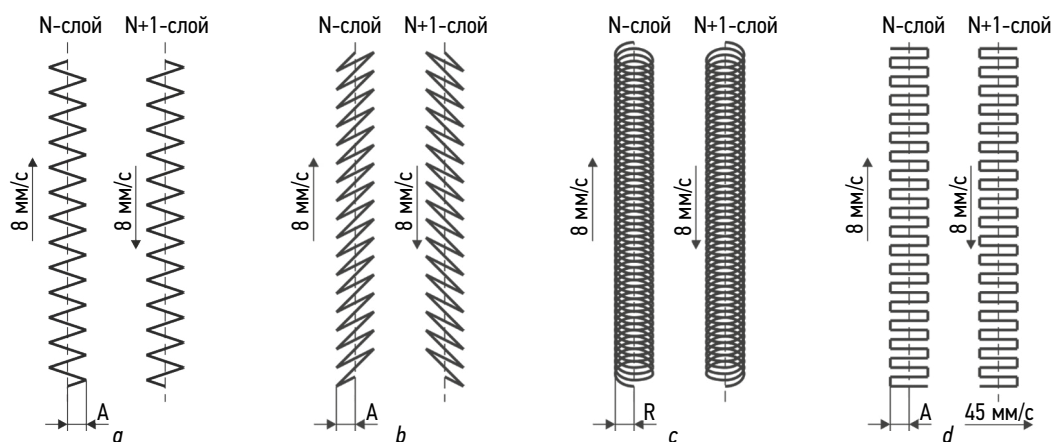


Рис. 1. Схема наплавки слоев: *a* — линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания; *b* — линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания; *c* — эллиптические колебания вдоль направления выращивания; *d* — змейка.

Fig. 1. Layer deposition pattern: *a*, linear oscillations normal to the manufacturing path; *b*, linear oscillations at a 45 degree angle to the manufacturing path; *c*, elliptical oscillations along the manufacturing path; *d*, zigzag.

при написании программы была задана одна прямая, при перемещении вдоль которой происходило поперечное колебание рабочего инструмента с заданной амплитудой (A) / радиусом (R) и частотой. Амплитуда, радиус и частота были выбраны такими, чтобы обеспечить ширину первого слоя на рабочем режиме, равную 15 мм. Скорость перемещения при этом задавалась вдоль направления выращивания и равнялась 8 мм/с.

В случае стратегии «змейка» задание скорости осуществлялось вдоль траектории. Значение этого параметра было выбрано таким, чтобы обеспечить скорость вдоль направления выращивания такой же, как и при других

рассмотренных стратегиях заполнения слоя. На основании предварительных экспериментов скорость движения инструмента вдоль траектории была выбрана равной 45 мм/с.

Параметры процесса для всех стратегий представлены в табл. 1.

Используемое оборудование

Для изготовления экспериментальных образцов был использован стенд электродугового выращивания. Составные части стенда, а также его принципиальная схема представлены в табл. 2 и на рис. 2 соответственно.

Таблица 1. Параметры процесса для исследуемых стратегий

Table 1. Process parameters for studied techniques

Траектория	Сварочный ток, А	Скорость, мм/с	Амплитуда/ радиус, мм	Частота, Гц
Линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания	90	8	6	2
Линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания		8	8,5	2
Эллиптические колебания вдоль направления выращивания		8	6	4
Змейка		8 (45)	5	–

Таблица 2. Составные части стенда электродугового выращивания

Table 2. WAAM jig components

№ п.п.	Наименование	Значение
1	Комплект дугowego оборудования	
1.1	Источник сварочный	Fronius TPS 500i
1.2	Устройство подающее	Fronius WF 25i + Fronius WF 60i Robacta
1.3	Горелка сварочная	Fronius MHP 500i
2	Система позиционирования инструмента и заготовки	
2.1	Робот-манипулятор + контроллер	Yaskawa AR2010 + Yaskawa YRC1000
2.2	Стол сварочный	Стол сварочный 1500×1000 мм

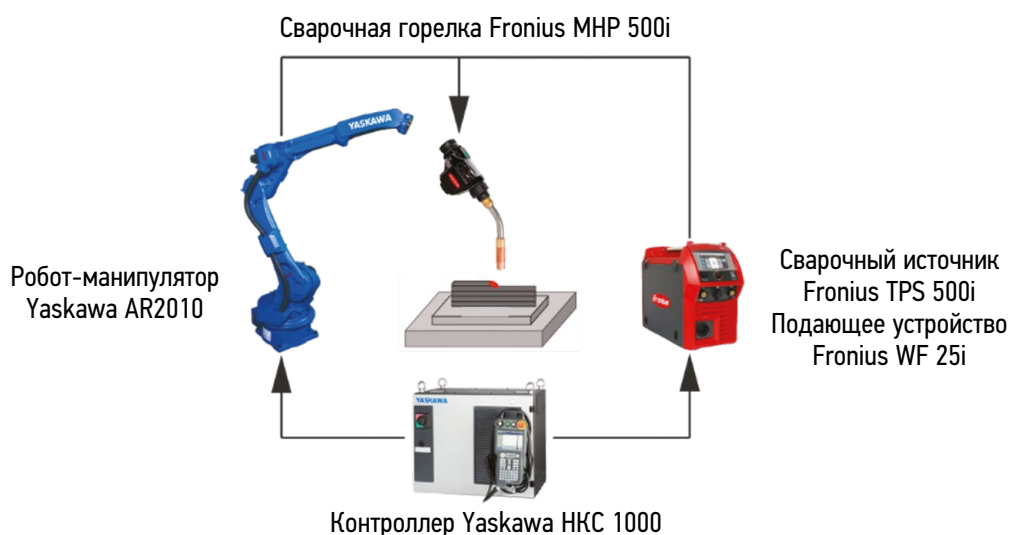


Рис. 2. Принципиальная схема стенда электродугового выращивания.

Fig. 2. Layout of the WAAM jig.

Таблица 3. Химический состав используемой проволоки

Table 3. Chemical composition of the wire used

Химический элемент	Al	Mg	Mn	Ti	Cr
Содержание, масс. %	94,73	4,94	0,11	0,11	0,11

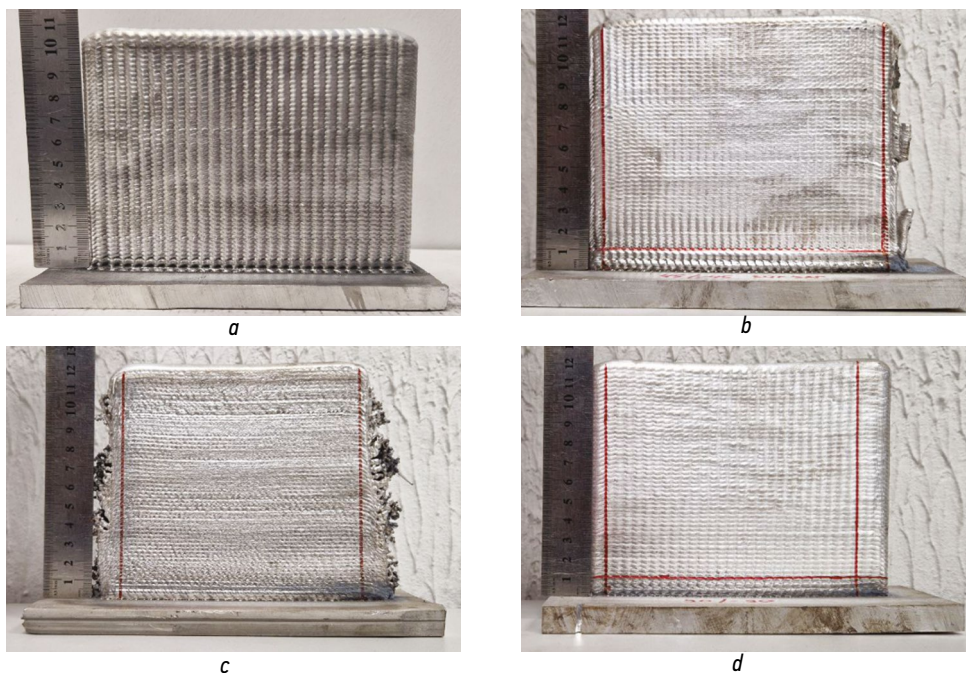


Рис. 3. Внешний вид полученных образцов: *a* — линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания; *b* — линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания; *c* — эллиптические колебания вдоль направления выращивания; *d* — змейка.

Fig. 3. View of manufactured samples: *a*, linear oscillations normal to the manufacturing path; *b*, linear oscillations at a 45 degree angle to the manufacturing path; *c*, elliptical oscillations along the manufacturing path; *d*, zigzag.

Используемые материалы

В качестве присадочного материала для изготовления экспериментальных образцов была использована сварочная проволока ER5356 (аналог АМг5) производства компании EWC диаметром 1,2 мм. Химический состав используемой проволоки согласно сертификату качества приведен в табл. 3.

Для обеспечения защиты сварочной ванны использовался аргон высокой чистоты по ГОСТ 10157-79.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стабильность формирования

Внешний вид полученных образцов представлен на рис. 3.

Наиболее стабильный процесс с точки зрения формирования был обеспечен при использовании стратегий со змейкой и с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания. В двух других стратегиях наблюдалось нестабильное формирование в начале и конце слоя, что в итоге привело к существенному уменьшению длины участка образца, пригодного для проведения последующих исследований (рис. 4). Так, образцы с линейными колебаниями под углом 45 градусов относительно

направления выращивания и с эллиптическими колебаниями имели длину стабильного участка порядка 135 мм вместо записанных изначально в управляющей программе 150 мм.

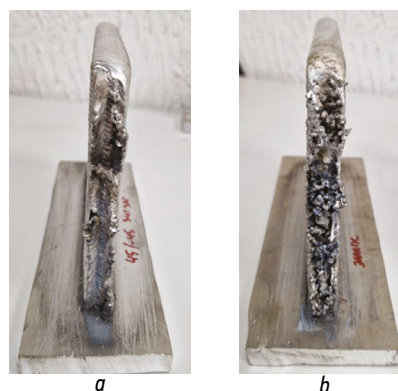


Рис. 4. Внешний вид участка начала/завершения процесса: *a* — линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания; *b* — эллиптические колебания вдоль направления выращивания.

Fig. 4. View of the area of process start/end: *a*, linear oscillations at a 45 degree angle to the manufacturing path; *b*, elliptical oscillations along the manufacturing path.

При визуальной оценке можно сказать, что качество боковой поверхности на всех образцах практически не отличается. Более выраженный рельеф поверхности имеет-ся на первом образце. При этом припуск на механическую обработку не превышает 1 мм. Наплывов и брызг обнаружено не было.

Металлографические исследования

Из выращенных образцов были вырезаны образцы для металлографических исследований. Макрошлифы представлены на рис. 5.

Во всех четырех образцах были обнаружены поры. Пористость — один из основных дефектов при работе с алюминиевыми сплавами. Большинство исследователей склоняется к тому, что основной причиной этого является растворенный водород. За счет большой разницы в растворимости водорода в жидкой и твердой фазах при кристаллизации происходит выделение большого объема газа. Из-за высокой скорости затвердевания не весь водород успевает выйти из сварочной ванны, в результате чего происходит его запечатывание внутри материала в виде сферических пор. Средний процент пористости по сечению для всех образцов не превышает 1 %.

Механические испытания

Из полученных образцов были изготовлены цилиндры для проведения механических испытаний. Результаты механических испытаний представлены в табл. 4.

Как видно из результатов механических испытаний, наилучшие свойства на растяжение показывает стратегия с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания. Предел прочности и относительное удлинение находятся в пределах стандартных значений для листового проката из сплава АМг5 или превышают их. Однако предел текучести на 4,7–5,7 % ниже эталонных значений. При этом анизотропия по пределу прочности не превышает 4 %.

Также стандартные значения свойств были достигнуты в направлении оси X при стратегии с линейными колебаниями под углом 45 градусов относительно направления выращивания. На одном из образцов, испытанных в направлении оси Z, после испытаний был обнаружен крупный дефект, что существенно снизило значения свойств (рис. 6). Поэтому данный образец был убран из рассмотрения.

На втором образце в направлении оси Z наблюдается просадка на 10,2 % по пределу прочности и на 7,5 %

Таблица 4. Результаты механических испытаний
Table 4. Mechanical test results

Стратегия	Направление	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания	X	105±1	268±2	29,9±2,7
	Z	104±1	258±1	21,6±0,8
Линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания	X	110±2	263±1	19,7±0,7
	Z	107±1	229±1	11,1±0,3
Эллиптические колебания вдоль направления выращивания	X	112±1	239±1	11,6±0,4
	Z	110±1	205±4	8,2±0,9
Змейка	X	104±1	249±9	30,3±0,1
	Z	107±2	168±1	5,3±0,4
Значение по ГОСТ 17232-99	—	110–120	255–265	12–13

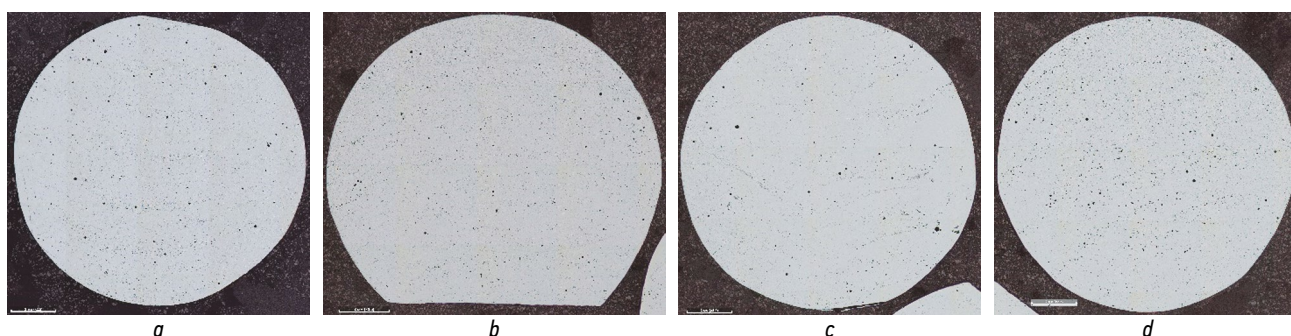


Рис. 5. Макрошлифы: *a* — линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания (пористость 0,93 %); *b* — эллиптические колебания вдоль направления выращивания (пористость 0,98 %); *c* — линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания (пористость 0,88 %); *d* — змейка (пористость 0,90 %).

Fig. 5. Large sections: *a*, linear oscillations normal to the manufacturing path (porosity 0,93%); *b*, elliptical oscillations along the manufacturing path (porosity 0,98%); *c*, linear oscillations at a 45 degree angle to the manufacturing path (porosity 0,88%); *d*, zigzag (porosity 0,90%).

по относительному удлинению в сравнении со значением по ГОСТ. Также наблюдается значительный уровень анизотропии по прочности — до 13 %. Анализ изломов показал, что разрушение образцов происходило по вязкому механизму. В обоих направлениях на изломах наблюдаются поры, в направлении оси Z наблюдаются области, обогащенные оксидом, за счет чего происходит охрупчивание материала и более раннее разрушение образца (рис. 7).

В случае эллиптических колебаний предел прочности и относительное удлинение в направлении X ниже требуемых на 6,3 и 3,3 % соответственно, в направлении оси Z — на 19,6 и 31,7 % соответственно. Анизотропия

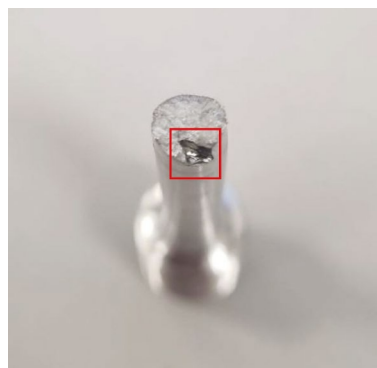


Рис. 6. Дефект на изломе после механических испытаний.
Fig. 6. Fracture face after mechanical tests.

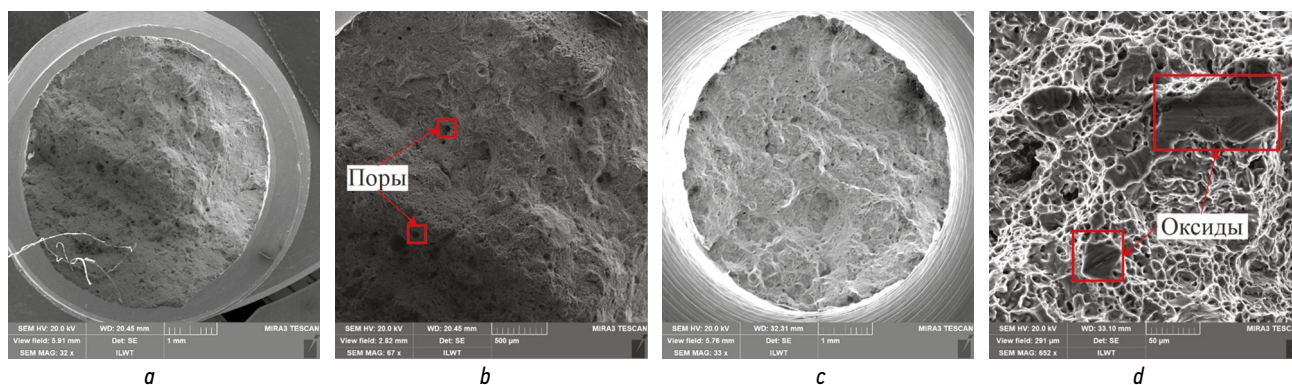


Рис. 7. Внешний вид изломов: *a* — общий вид, направление X; *b* — поры, направление X; *c* — общий вид, направление Z; *d* — участки, обогащенные оксидом, направление Z.
Fig. 7. Fractures view: *a*, general view, axis X; *b*, pores, axis X; *c*, general view, axis Z; *d*, oxide-rich areas, axis Z.

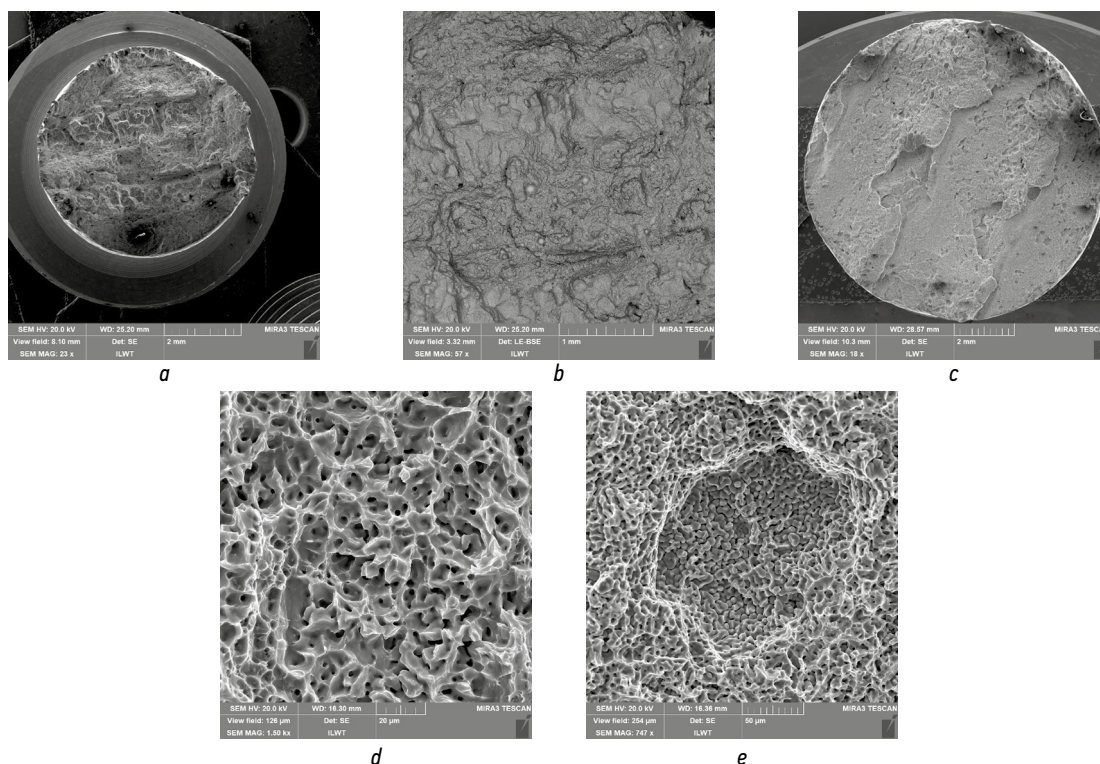


Рис. 8. Внешний вид изломов: *a* — общий вид, направление X; *b* — увеличение, направление X; *c* — общий вид, направление Z; *d* — участок с вязким характером разрушения, направление Z; *e* — участок с хрупким характером разрушения, направление Z.
Fig. 8. Fractures view: *a*, general view, axis X; *b*, magnification, axis X; *c*, general view, axis Z; *d*, ductile fracture area, axis Z; *e*, brittle fracture area, axis Z.

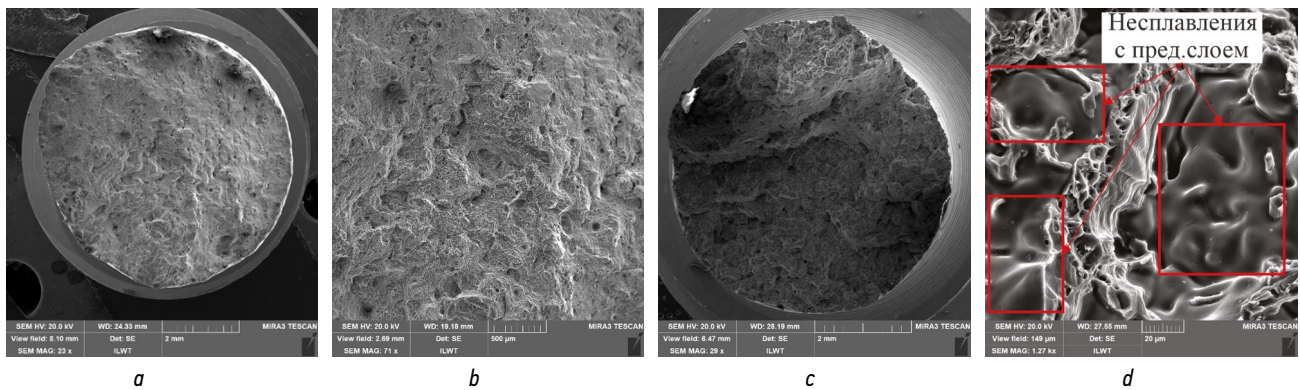


Рис. 9. Внешний вид изломов: *a* — общий вид, направление X; *b* — увеличение, направление X; *c* — общий вид, направление Z; *d* — область с несплавлениями между слоями, направление Z.

Fig. 9. Fractures view: *a*, general view, axis X; *b*, magnification, axis X; *c*, general view, axis Z; *d*, disbands between layers, axis Z.

свойств по прочности составила 14,2 %. Анализ изломов показал, что разрушение в направлении оси X происходило по вязкому механизму, а в направлении оси Z — по вязко-хрупкому (рис. 8).

При использовании стратегии «змейка» наблюдается существенная просадка свойств в направлении оси Z. В направлении оси X свойства ниже приведенных в ГОСТ на 2,4 %. Анализ изломов показал, что разрушение образца в вертикальном направлении происходило по хрупкому механизму. Также были обнаружены участки, в которых не происходило сплавление слоев друг с другом, что также привело к снижению свойств в этом направлении. Вдоль оси X наблюдался вязкий характер разрушения (рис. 9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы представлены результаты исследования влияния стратегии наплавки слоя на формирование, структуру и свойства алюминиевого сплава ER5356. Были рассмотрены четыре стратегии: линейные колебания перпендикулярно направлению выращивания, линейные колебания под углом 45 градусов относительно направления выращивания, эллиптические колебания вдоль направления выращивания, а также змейка перпендикулярно направлению выращивания.

Исследование показало, что наилучшее формирование было достигнуто при линейных колебаниях перпендикулярно направлению выращивания и змейке. В двух других случаях на участках начала/завершения процесса наблюдалось нестабильное поведение дуги, что привело к плохому формированию. С точки зрения боковой поверхности существенной разницы между стратегиями обнаружено не было.

Макроструктура наплавленного материала во всех случаях была одинаковой. Во всех образцах были обнаружены поры (не превышает 1 % по площади сечения), а на образце с линейными колебаниями под углом

45 градусов относительно направления выращивания также были обнаружены трещины, распространяющиеся по границам валиков.

Механические свойства на уровне стандартных значений (предел прочности 255–265 МПа) для проката были достигнуты только при использовании стратегии с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания. При линейных колебаниях под углом 45 градусов свойства в направлении оси X были также на уровне проката, однако в вертикальном направлении наблюдалась просадка до 229 МПа. В двух других стратегиях свойства были значительно ниже стандартных. Снижения уровня анизотропии удалось достичь также только при использовании стратегии с линейными колебаниями перпендикулярно направлению выращивания.

Анализ изломов показал, что в стратегиях с линейными колебаниями в обоих направлениях характер разрушения был вязким. В двух других стратегиях в направлении оси Z наблюдался хрупкий характер разрушения, что и привело к снижению свойств в данном направлении.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: К.С. Насоновский — анализ результатов, написание текста статьи; А.А. Воронин — выполнение экспериментальной части исследования; Д.В. Волосевич — выполнение металлографических исследований; Н.Д. Рощин — выполнение экспериментальной части исследования; Р.С. Корсмик — руководство, редактирование текста статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: K.S. Nasonovskiy, analyzing the results, writing the text of the article; A.A. Voropaev,

experimental part of the study; D.V. Volosevich, metallographic research; N.D. Roschin, experimental part of the study; R.S. Korsmik, management, editing of the text of the article.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // *Mater Des.* 2014. Vol. 56. P. 862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002
2. Georgantzi E., Gkantou M., Kamaris G.S. Aluminium alloys as structural material: A review of research // *Eng Struct.* 2021. Vol. 227. ID 111372. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111372
3. Starke E.A., Staley J.T. Application of modern aluminum alloys to aircraft // *Prog Aerosp Sci.* 1996. Vol. 32, N 2-3. P. 131–172. doi: 10.1016/0376-0421(95)00004-6
4. Williams S.W., Martina F., Addison A.C., et al. Wire + Arc Additive Manufacturing // *Mater Sci Technol.* 2016. Vol. 32, N 7. P. 641–647. doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073
5. Mohd Mansor M.S., Raja S., Yusof F., et al. Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies // *J Mater Res Technol.* 2024. Vol. 30. P. 2478–2499. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.03.170
6. Ayarkwa K.F., Pintera Z., Eimer E., et al. Effect of the deposition strategy on Al-Cu alloy Wire + Arc Additive Manufacture // *Mater Sci Eng Technol.* 2021. Vol. 1.
7. Rodrigues T.A., Cipriano Farias F.W., Zhang K., et al. Wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel / Inconel 625 functionally graded material: development and characterization // *J Mater Res Technol.* 2022. Vol. 21. P. 237–251. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.169
8. Wei Y., Liu F., Liu F., et al. Effect of arc oscillation on porosity and mechanical properties of 2319 aluminum alloy fabricated by CMT-wire arc additive manufacturing // *J Mater Res Technol.* 2023. Vol. 24. P. 3477–3490. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.203
9. Venturini G., Montevecchi F., Scippa A., Campatelli G. Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features // *Procedia CIRP.* 2016. Vol. 55. P. 95–100. doi: 10.1016/j.procir.2016.08.043
10. Aldalur E., Veiga F., Suárez A., et al. High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties // *J Manuf Process.* 2020. Vol. 58. P. 615–626. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.08.060
11. Chakkravarthy V., Jerome S. Printability of multiwalled SS 316L by wire arc additive manufacturing route with tunable texture // *Mater Lett.* 2020. Vol. 260. ID 126981. doi: 10.1016/j.matlet.2019.126981
12. Xu X., Ding J., Ganguly S., et al. Preliminary investigation of building strategies of maraging steel bulk material using Wire + Arc Additive Manufacture // *J Mater Eng Perform.* 2018. Vol. 28. P. 594–600. doi: 10.1007/s11665-018-3521-5
13. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing // *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. Vol. 73. P. 173–183. doi: 10.1007/s00170-014-5808-5
14. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) // *Robot Comput-Integr Manuf.* 2015. Vol. 31. P. 101–110. doi: 10.1016/j.rcim.2014.08.008

REFERENCES

1. Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Mater Des.* 2014;56:862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002
2. Georgantzi E, Gkantou M, Kamaris GS. Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Eng Struct.* 2021;227:111372. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111372
3. Starke EA, Staley JT. Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Prog Aerosp Sci.* 1996;32(2-3):131–172. doi: 10.1016/0376-0421(95)00004-6
4. Williams SW, Martina F, Addison AC, et al. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Mater Sci Technol.* 2016;32(7):641–647. doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073
5. Mohd Mansor MS, Raja S, Yusof F, et al. Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies. *J Mater Res Technol.* 2024;30:2478–2499. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.03.170
6. Ayarkwa KF, Pintera Z, Eimer E, et al. Effect of the deposition strategy on Al-Cu alloy Wire + Arc Additive Manufacture. *Mater Sci Eng Technol.* 2021. Vol. 1.
7. Rodrigues TA, Cipriano Farias FW, Zhang K, et al. Wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel / Inconel 625 functionally graded material: development and characterization. *J Mater Res Technol.* 2022;21:237–251. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.169

8. Wei Y, Liu F, Liu F, et al. Effect of arc oscillation on porosity and mechanical properties of 2319 aluminum alloy fabricated by CMT-wire arc additive manufacturing. *J Mater Res Technol.* 2023;24:3477–3490. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.203
9. Venturini G, Montevecchi F, Scippa A, Campatelli G. Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features. *Procedia CIRP.* 2016;55:95–100. doi: 10.1016/j.procir.2016.08.043
10. Aldalur E, Veiga F, Suárez A, et al. High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties. *J Manuf Process.* 2020;58:615–626. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.08.060
11. Chakkravarthy V, Jerome S. Printability of multiwalled SS 316L by wire arc additive manufacturing route with tunable texture. *Mater Lett.* 2020;260:126981. doi: 10.1016/j.matlet.2019.126981

12. Xu X, Ding J, Ganguly S, et al. Preliminary investigation of building strategies of maraging steel bulk material using Wire + Arc Additive Manufacture. *J Mater Eng Perform.* 2018;28:594–600. doi: 10.1007/s11665-018-3521-5
13. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol.* 2014;73:173–183. doi: 10.1007/s00170-014-5808-5
14. Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robot Comput-Integr Manuf.* 2015;31:101–110. doi: 10.1016/j.rcim.2014.08.008

ОБ АВТОРАХ

***Константин Сергеевич Насоновский**, магистр;
адрес: 198262, Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, д. 38Б;
ORCID: 0000-0002-0069-2698; eLibrary SPIN: 3236-9603;
e-mail: nasonovskiy.konstantin@gmail.com

Артем Александрович Воропаев, аспирант;
ORCID: 0000-0002-1400-012X;
e-mail: t-voropaev94@mail.ru

Дарья Владимировна Волосевич, магистр;
ORCID: 0000-0002-2288-2935;
e-mail: dasha.volosevich@mail.ru

Никита Дмитриевич Рошин, бакалавр;
e-mail: n.d.roschin@gmail.com

Рудольф Сергеевич Корсмик, канд. техн. наук;
ORCID: 0000-0003-1591-1942; eLibrary SPIN: 6726-2629;
e-mail: rudak27@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Konstantin S. Nasonovskiy**, Master's Degree student;
address: 38B ave Marshal Zhukov, Saint Petersburg, 198262,
Russia; ORCID: 0000-0002-0069-2698; eLibrary SPIN: 3236-9603;
e-mail: nasonovskiy.konstantin@gmail.com

Artem A. Voropaev, postgraduate student;
ORCID: 0000-0002-1400-012X;
e-mail: t-voropaev94@mail.ru

Darya V. Volosevich, Master's Degree student;
ORCID: 0000-0002-2288-2935;
e-mail: dasha.volosevich@mail.ru

Nikita D. Roschin, Bachelor's degree;
e-mail: n.d.roschin@gmail.com

Rudolf S. Korsmik, Cand. Sci. (Engineering);
ORCID: 0000-0003-1591-1942; eLibrary SPIN: 6726-2629;
e-mail: rudak27@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author